



TUGAS AKHIR - TE 141599

PENENTUAN LOKASI OPTIMAL SVC MENGGUNAKAN
METODE CONTINUATION POWER FLOW (CPF) UNTUK
MENINGKATKAN STABILITAS TEGANGAN STEADY STATE
DENGAN MINIMUM LOSSES

I Nyoman Rasmiyanto
NRP 2213 106 053

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

DETERMINING OPTIMAL LOCATION OF SVC USING
CONTINUATION POWER FLOW (CPF) METHOD TO
IMPROVE STEADY STATE VOLTAGE STABILITY WITH
MINIMUM LOSSES

I Nyoman Rasmiyanto
NRP 2213 106 053

Advisors
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

**PENENTUAN LOKASI OPTIMAL SVC MENGGUNAKAN
METODE *CONTINUATION POWER FLOW* (CPF) UNTUK
MENINGKATKAN STABILITAS TEGANGAN *STEADY STATE*
DENGAN MINIMUM *LOSSES***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196304051990021001

Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001



PENENTUAN LOKASI OPTIMAL SVC MENGGUNAKAN METODE CONTINUATION POWER FLOW (CPF) UNTUK MENINGKATKAN STABILITAS TEGANGAN STEADY STATE DENGAN MINIMUM LOSSES

Nama/NRP : I Nyoman Rasmiyanto (2213106053)
Jurusan : Teknik Elektro FTI-ITS
Dosen Pembimbing : - Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
- Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRAK

Stabilitas tegangan menjadi salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga listrik. *Static VAR Compensator* (SVC) adalah salah satu peralatan elektronik *solid state* yang mampu mengatur transmisi daya listrik secara fleksibel yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Pada tugas akhir ini dilakukan penentuan lokasi optimal dari SVC menggunakan metode *continuation power flow* (CPF) untuk meningkatkan stabilitas tegangan *steady state* dengan *minimum losses*.

Metode tersebut menjelaskan bagaimana stabilitas tegangan dapat ditingkatkan dengan metode *continuation power flow*. Kestabilan tegangan dapat diketahui dari nilai titik kritis. Titik kritis tersebut dapat digunakan untuk menentukan lokasi SVC. Nilai VAR SVC akan diubah-ubah dan dianalisis untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kestabilan tegangan dan *losses*. Dari penempatan SVC, diharapkan stabilitas tegangan akan meningkat sehingga berpengaruh terhadap berkurangnya *losses*.

Kata kunci : *Stabilitas Tegangan, Continuation Power Flow, SVC*

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

**DETERMINING OPTIMAL LOCATION OF SVC USING
CONTINUATION POWER FLOW (CPF) METHOD TO
IMPROVE STEADY STATE VOLTAGE STABILITY WITH
MINIMUM LOSSES**

Name/NRP : I Nyoman Rasmiyanto (2213106053)
Department : Electrical Engineering Department, Faculty
of Industrial Technology, ITS
Advisors : - Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
- Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRACT

Voltage stability is one factor to be considered in the planning and operation of the power system. Static VAR Compensator (SVC) is one of solid state electronic device that is able to regulate the transmission of electrical power that can be used flexibly to overcome these problems. In this final project, optimal location of SVC is determined with using the method of continuation power flow (CPF) to improve steady state voltage stability with minimum losses.

The method describes how the voltage stability can be enhanced by the continuation power flow method. Voltage stability can be known from the value of the critical point. The critical point can be used to determine the location of SVC. SVC VAR value will be changed and analyzed to know effects on the voltage stability and losses. SVC placement is expected to enhance voltage stability and contributes to reduce the losses.

Keywords: Voltage Stability, Continuation Power Flow, SVC

\

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Sistematika Laporan	3
1.7 Relevansi	4
BAB 2 DASAR TEORI	5
2.1 SVC (<i>Static Var Compensator</i>)	5
2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	9
2.3 Studi Aliran Daya	10
2.3.1 Persamaan Aliran Daya	10
2.4 Metode <i>Newton Raphson</i>	12
2.5 Besaran Per Unit (PU)	14
2.6 <i>Continuation Power Flow</i>	15
BAB 3 LANGKAH-LANGKAH <i>METODE CONTINUATION POWER FLOW</i>	19
3.1. Simulasi Aliran Daya.....	20
3.2. Parameter <i>Continuation Power Flow</i>	21
3.3. Menghitung Tangen Vektor.....	21
3.4. Menghitung Prediktor dan Menentukan Titik Kritis.....	22
3.5. Koreksi Prediktor	22
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS PENENTUAN LOKASI OPTIMAL SVC MENGGUNAKAN <i>METODE CONTINUATION POWER FLOW</i>	25
4.1 Data Jawa Bali 500kV	25

4.2	<i>Continuation Power Flow</i> pada Sistem Jawa Bali 500kV	31
4.3	Kenaikan Beban	33
4.4	Hasil Simulasi.....	34
4.4.1	Penambahan Beban pada Bus Beban.....	34
4.4.2	Penentuan Bus yang paling Rentan dengan Perubahan Beban.....	59
4.5	Penentuan Nilai Kapasitas SVC pada Bus.....	61
BAB 5 PENUTUP		67
5.1	Kesimpulan.....	67
5.2	Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA		69
RIWAYAT PENULIS		71
LAMPIRAN		73

DAFTAR TABEL

TABEL	HALAMAN
Tabel 4.1.1 Data Bus Sistem Jawa Bali 500kV	25
Tabel 4.1.2 Data Resistansi dan Reaktansi Pada Saluran Sistem Jawa Bali 500kV.	28
Tabel 4.4.1.1 Tabel Data Bus 2 Saat Penambahan Beban pada Bus 2.	35
Tabel 4.4.1.2 Tabel Data Bus 3 Saat Penambahan Beban pada Bus 3.	36
Tabel 4.4.1.3 Tabel Data Bus 4 Saat Penambahan Beban pada Bus 4.	37
Tabel 4.4.1.4 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 5.	39
Tabel 4.4.1.5 Tabel Data Bus 6 Saat Penambahan Beban pada Bus 6.	40
Tabel 4.4.1.6 Tabel Data Bus 7 Saat Penambahan Beban pada Bus 7.	42
Tabel 4.4.1.7 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 8.	43
Tabel 4.4.1.8 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 9.	45
Tabel 4.4.1.9 Tabel Data Bus 11 Saat Penambahan Beban pada Bus 11.	46
Tabel 4.4.1.10 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 12.	48
Tabel 4.4.1.11 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 15.	49
Tabel 4.4.1.12 Tabel Data Bus 11 Saat Penambahan Beban pada Bus 16.	51
Tabel 4.4.1.13 Tabel Data Bus 18 Saat Penambahan Beban pada Bus 18.	52
Tabel 4.4.1.14 Tabel Data Bus 19 Saat Penambahan Beban pada Bus 19.	54
Tabel 4.4.1.15 Tabel Data Bus 20 Saat Penambahan Beban pada Bus 20.	55
Tabel 4.4.1.16 Tabel Data Bus 19 Saat Penambahan Beban pada Bus 22.	57
Tabel 4.4.1.17 Tabel Data Bus 24 Saat Penambahan Beban pada Bus 24.	58
Tabel 4.4.2.1 Tabel Data Bus yang Rentan dengan Perubahan Beban.	59
Tabel 4.5.1 Tabel Data Injeksi VAR SVC pada Bus Tasikmalaya.	61
Tabel 4.5.2 Tabel Data Injeksi VAR SVC pada Bus Kembangan.	63
Tabel 4.5.3 Tabel Data Perbandingan Magnitude.	64
Tabel 4.5.4 Tabel Data Perbandingan Losses Saluran.	66

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	HALAMAN
Gambar 2.1 Pemodelan SVC	6
Gambar 2.2 Kurva Daya Reaktif dan Tegangan pada SVC.	8
Gambar 2.3 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik.	10
Gambar 2.4 Penggambaran Bus Secara Umum	11
Gambar 2.5 Skema Prediktor dan Korektor pada <i>Continuation Power Flow</i>	15
Gambar 3.1 Diagram Alir <i>Continuation Power Flow</i>	19
Gambar 4.1.1 Grafik Bus Beban dalam MW dan MVAR.....	27
Gambar 4.1.2 Grafik Pembangkit Generator dalam MW dan MVAR.	27
Gambar 4.1.3 Single Line Diagram Sistem Jawa Bali 500kV.	30
Gambar 4.2.1 Kurva Nose untuk Analisa Kestabilan Tegangan.	32
Gambar 4.2.2 Prediktor-Korektor pada Kurva <i>Nose</i>	33
Gambar 4.4.1.1 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 2(Cilegon). 34	
Gambar 4.4.1.2 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 2 (Cilegon).....	35
Gambar 4.4.1.3 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 3(Cawang) 35	
Gambar 4.4.1.4 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 3 (Cawang)	36
Gambar 4.4.1.5 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 4(Balaraja) 37	
Gambar 4.4.1.6 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 4 (Balaraja)	38
Gambar 4.4.1.7 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 5 (Kembangan).....	38
Gambar 4.4.1.8 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 5 (Kembangan)	39
Gambar 4.4.1.9 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 6 (Bekasi) . 40	
Gambar 4.4.1.10 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 6 (Bekasi).....	41
Gambar 4.4.1.11 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 7 (Gandul)	41
Gambar 4.4.1.12 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 7 (Gandul).....	42
Gambar 4.4.1.13 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 8 (Cibinong).....	43
Gambar 4.4.1.14 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 8 (Cibinong).....	44

Gambar 4.4.1.15 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 9 (Depok)	44
Gambar 4.4.1.16 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 9 (Depok)	45
Gambar 4.4.1.17 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 11 (Tasikmalaya).....	46
Gambar 4.4.1.18 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 11 (Tasikmalaya).....	47
Gambar 4.4.1.19 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 12 (Cibatu).....	47
Gambar 4.4.1.20 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 12 (Cibatu)	48
Gambar 4.4.1.21 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 15 (Bandung Selatan)	49
Gambar 4.4.1.22 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 15 (Bandung Selatan).....	50
Gambar 4.4.1.23 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 16 (Mandiracan)	50
Gambar 4.4.1.24 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 16 (Mandiracan).....	51
Gambar 4.4.1.25 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 18 (Ungaran).....	52
Gambar 4.4.1.26 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 18 (Ungaran)	53
Gambar 4.4.1.27 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 19 (Pedan).....	53
Gambar 4.4.1.28 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 16 (Mandiracan).....	54
Gambar 4.4.1.29 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 20 (Ngimbang)	55
Gambar 4.4.1.30 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 20 (Ngimbang)	56
Gambar 4.4.1.31 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 22 (Surabaya Barat).....	56
Gambar 4.4.1.32 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 22 (Surabaya Barat).....	57
Gambar 4.4.1.33 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 24 (Kediri).....	58
Gambar 4.4.1.34 Grafik Magnitude Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 24 (Kediri).....	59

Gambar 4.4.2.1 Grafik Bus yang Rentan dengan Perubahan Beban	60
Gambar 4.4.2.2 Kurva CPF pada Bus yang Rentan dengan Perubahan Beban.....	61
Gambar 4.5.1 Kurva CPF pada Bus Tasikmalaya dengan Injeksi VAR 250 MVAR	62
Gambar 4.5.2 Kurva CPF pada Bus Tasikmalaya dengan Injeksi VAR 310 MVAR	62
Gambar 4.5.3 Kurva CPF pada Bus Kembangan dengan Injeksi VAR 480 MVAR	63
Gambar 4.5.4 Kurva CPF pada Bus Kembangan dengan Injeksi VAR 750 MVAR	64

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permintaan kebutuhan listrik kian meningkat pesat, konsekuensi dari hal ini adalah adanya ancaman terhadap kestabilan sistem. Stabilitas tegangan menjadi salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga listrik. Fenomena *drop voltage* harus dihindari dan kejadian tersebut dapat disebabkan oleh beberapa kondisi seperti pembebanan yang tinggi, atau gangguan yang lain [1].

Untuk mengatasi fenomena tersebut pada sistem transmisi, dipasang kapasitor bank (*fix capacitor*) dan *Flexible AC Transmission System* (FACTS) Device, salah satunya adalah *Static Var Compesator* (SVC) [1]. SVC adalah alat yang dapat menghasilkan atau menyerap daya reaktif statis yang dihubungkan paralel dan mempunyai keluaran (output) yang bervariasi untuk menjaga atau mengontrol parameter spesifik dari suatu sistem tenaga listrik. Tujuan utama pemasangan SVC adalah untuk menjaga perubahan tegangan pada bus dalam jaringan sistem tenaga listrik serta untuk meningkatkan stabilitas tegangan dengan cara menyuntikkan daya reaktif dengan mengendalikan arus kapasitif atau arus induktif

Oleh karena itu untuk menghindari kondisi penurunan tegangan karena lonjakan beban. Tugas akhir ini dibuat untuk menganalisa aliran daya terhadap kenaikan beban menggunakan metode *continuation power flow* (CPF) [2]. Metode ini digunakan untuk mencari lokasi pada bus yang rentan terhadap peningkatan beban, sehingga didapatkan lokasi optimal untuk penempatan SVC. Data tersebut dibandingkan dengan menggunakan SVC, sehingga diperoleh efektifitas penggunaan SVC. Dari penempatan SVC, maka stabilitas tegangan akan meningkat sehingga berpengaruh terhadap berkurangnya *losses* [3].

1.2 Permasalahan

Berbagai permasalahan yang akan diselesaikan dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Bagaimana menambahkan beban aktif pada pembuatan program penentuan lokasi optimal SVC dengan menggunakan metode *Continuation Power Flow* (CPF).

2. Bagaimana menentukan nilai kapasitas SVC yang diinjeksikan pada bus yang rentan dengan perubahan beban.
3. Bagaimana mengetahui pengaruh dari pemasangan SVC terhadap stabilitas tegangan dan *losses* pada sistem tenaga listrik Jawa Bali 500 KV.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam tugas akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan dan asumsi sebagai berikut;

1. Dalam Tugas Akhir ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab.
2. Metode penentuan lokasi yang digunakan adalah *Continuation Power Flow*.
3. Metode aliran daya yang digunakan adalah *Newton Raphson*.
4. Penentuan kapasitas VAR SVC dengan menggunakan kurva CPF.
5. Nilai kapasitas VAR SVC berubah-ubah (*variable*) sesuai dengan nilai bebannya.
6. Model sistem tenaga listrik yang digunakan adalah sistem Jawa Bali 500 kV.
7. Penambahan beban dilakukan pada semua bus beban kecuali bus Generator.
8. Beban yang dinaikkan adalah beban aktif.

1.4 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut:

1. Menentukan nilai titik kritis (*critical point*) dan nilai lambda maksimum pada setiap bus dengan penambahan beban di semua bus.
2. Menentukan lokasi penempatan SVC dengan cara mengetahui bus yang paling rentan dengan perubahan beban melalui kurva *nose*.
3. Mengetahui nilai kapasitas VAR (*variable*) yang di injeksikan pada bus sesuai dengan nilai bebannya.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam penelitian dan tugas akhir ini adalah:

1. Studi Literatur

Penulis mempelajari mengenai studi aliran daya, kestabilan tegangan, dan pemrograman Matlab dari buku literatur, buku tugas akhir, jurnal IEEE, dan artikel-artikel dari internet. Hal ini dilakukan untuk mengetahui metode maupun karakteristik yang akan dipelajari dalam penelitian tugas akhir ini

2. Pembuatan Program
Setelah melakukan studi literatur aliran daya menggunakan metode *continuation power flow* dilanjutkan dengan membuat pemodelan menggunakan pemrograman matlab
3. Pengujian Program dan Analisa Data
Setelah program selesai dibuat, penulis melakukan uji coba terhadap program yang telah dirancang untuk menghasilkan keluaran kurva *nose* berupa data tegangan dan lambda. Dengan diketahuinya titik kritis dan kurva hubungan antara tegangan terhadap beban, maka penulis akan menganalisa bagaimana kondisi tersebut bisa terjadi.
4. Penulisan Buku Tugas Akhir
Sebagai hasil akhir dari penelitian dilakukan penulisan laporan dalam bentuk buku tugas akhir.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab akan terurai sebagai berikut:

BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.

BAB 2 mengenai landasan teori yang membahas tentang SVC, aliran daya, metode *continuation power flow*, dan kestabilan tegangan. Pada bagian SVC akan dibahas mengenai fungsi, dan pemodelan SVC. Pada bagian aliran daya akan dibahas mengenai bagaimana asal mula studi aliran daya, bagaimana langkah penyelesaiannya. Pada bagian ini lebih dibahas mengenai metode Newton Raphson untuk menyelesaikan aliran daya dalam kondisi awal. Pada bagian metode *continuation power flow* dibahas bagaimana cara mengetahui titik kritis pada masing-masing bus yang akan di beri pembebanan dengan menggunakan proses prediktor dan korektor, sehingga dapat diketahui bus yang rentan terhadap perubahan beban.

BAB 3 berisi tentang metodologi bagaimana metode *continuation power flow* ini bekerja dengan menampilkan diagram alir dan ulasan mengenai masing-masing bagian dari diagram alir tersebut.

BAB 4 berisi tentang hasil dari simulasi program *continuation power flow* beserta analisa mengenai masing-masing bus terhadap pengaruh pembebanan pada semua bus dan bagaimana pengaruh perubahan kestabilan tegangan jika dipasang SVC pada bus yang telah ditentukan.

BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran-saran.

1.7 Relevansi

Tugas akhir ini bisa dijadikan referensi untuk menentukan lokasi yang optimal pemasangan SVC pada sistem Jawa Bali 500kV dalam memenuhi kebutuhan beban yang bisa meningkat sewaktu-waktu beserta bagaimana menanggulangnya. Serta bisa dijadikan acuan dasar jika akan diadakan penelitian tugas akhir berikutnya yang menggunakan metode *continuation power flow* sebagai salah satu teknik dasar dalam menganalisa kestabilan tegangan.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 SVC (*Static Var Compensator*)

SVC (*Static Var Compensator*) adalah komponen FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) dengan hubungan paralel, yang fungsi utamanya untuk menyuntikkan atau menyerap daya reaktif statis yang terkendali dan dihubungkan paralel yang mempunyai keluaran (*output*) yang bervariasi untuk mempertahankan atau mengontrol variabel tertentu pada sistem tenaga listrik, terutama tegangan pada bus.

Prinsip kerja SVC (*Static Var Compensator*) yaitu dengan cara mengatur sudut penyalan thyristor, sehingga dapat mengatur keluaran daya reaktif dari SVC. Nilai tegangan sistem merupakan *input* bagi pengendali, yang kemudian akan mengatur sudut penyalan thyristor. Dengan demikian SVC akan memberikan kompensasi daya reaktif yang sesuai dengan kebutuhan sistem. Dalam bentuk yang paling sederhana, SVC terdiri dari komponen *Fixed Capacitor* (FC) yang terhubung paralel dengan *Thyristor Controlled Reactor* (TCR). Kontrol sudut penyalan thyristor memungkinkan SVC untuk memiliki kecepatan respon yang hampir seketika. Hal ini digunakan secara luas untuk menyalurkan daya reaktif dan menyediakan *support* regulasi tegangan dengan cepat. Selain itu, SVC juga dipakai untuk meningkatkan batas stabilitas sistem dan mengurangi osilasi daya.

Kebutuhan daya reaktif pada sistem dapat dipasok oleh unit pembangkit, sistem transmisi, reaktor dan kapasitor. Karena kebutuhan daya reaktif pada sistem bervariasi yang disebabkan oleh perubahan beban, komposisi unit pembangkit yang beroperasi, perubahan konfigurasi jaringan, hal ini berdampak pada bervariasinya *level* tegangan pada sistem transmisi.

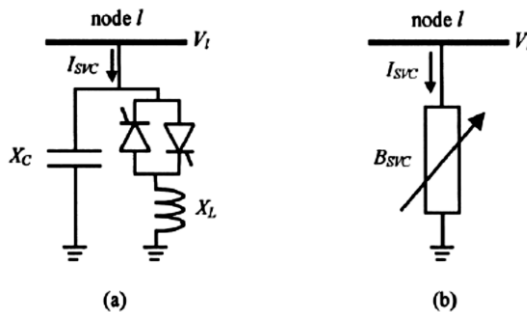
SVC dapat dengan cepat memberikan *supply* daya reaktif yang diperlukan dari sistem sehingga besarnya tegangan pada sistem transmisi dapat dipertahankan sesuai dengan standar yang diizinkan. Secara lebih rinci fungsi SVC adalah :

1. Meningkatkan kapasitas sistem transmisi.
2. Kontrol tegangan.
3. Reaktif control power / reaktif control aliran power.

4. Penurunan dan atau pembatasan frekuensi *overvoltage power* disebabkan *load rejection*.
5. Memperbaiki stabilitas jaringan AC.
6. Mencegah terjadinya ketidakstabilan tegangan.

Untuk menganalisa injeksi daya reaktif SVC pada suatu sistem tenaga listrik, SVC dapat dimodelkan dengan beberapa cara sebagai berikut:

- **Model Firing Angle SVC.** Pemodelan *SVC* berupa reaktansi ekuivalen X_{svc} , yang merupakan fungsi dari perubahan sudut penyalan α , yang terdiri dari kombinasi paralel admitansi ekuivalen *thyristor controlled reactor* (TCR) dan reaktansi kapasitif tetap, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1(a). Model ini memberikan informasi mengenai sudut penyalan *SVC* yang diperlukan untuk mencapai tingkat kompensasi tertentu.
- **Model Total Susceptance SVC.** *SVC* dilihat sebagai sebuah reaktansi yang dapat diatur melalui perubahan susceptansi B_{svc} , yang melambangkan nilai susceptansi *SVC* total yang diperlukan untuk mempertahankan besar tegangan bus pada nilai tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1(b).



Gambar 2.1 Pemodelan SVC

Konfigurasi yang paling populer untuk *SVC* adalah kombinasi dari *fixed capacitor* (FC) dan *thyristor controlled reactor* (TCR). Dalam pemodelan *SVC* sebagai *variable VAR sources* seperti pada Gambar 2.1(b), kita dapat menetapkan batas maksimum dan minimum pada keluaran daya reaktif (Q_{svc}), masing-masing sesuai dengan susceptansi

induktif (B_{ind}) dan susceptansi kapasitif (B_{cap}) yang tersedia dan tegangan referensi (V_{ref}) Batasan ini dapat ditulis pada persamaan.

$$\begin{aligned} Q_{max} &= B_{ind} \times V_{ref}^2 \\ Q_{min} &= B_{cap} \times V_{ref}^2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Dimana : $B_{ind} = \frac{1}{X_l} \quad B_{cap} = \frac{1}{X_c}$ (2.2)

X_l = Reaktansi Induktif
 X_c = Reaktansi Kapasitif

Sedangkan susceptansi (B) dari SVC dapat dinyatakan sebagai fungsi dari sudut penyalan α , ditunjukkan pada persamaan sebagai berikut ini:

$$B_{svc} = B_{cap} - B_{ind}(\alpha) \quad (2.3)$$

Daya reaktif yang dihasilkan oleh SVC dihitung melalui persamaan.

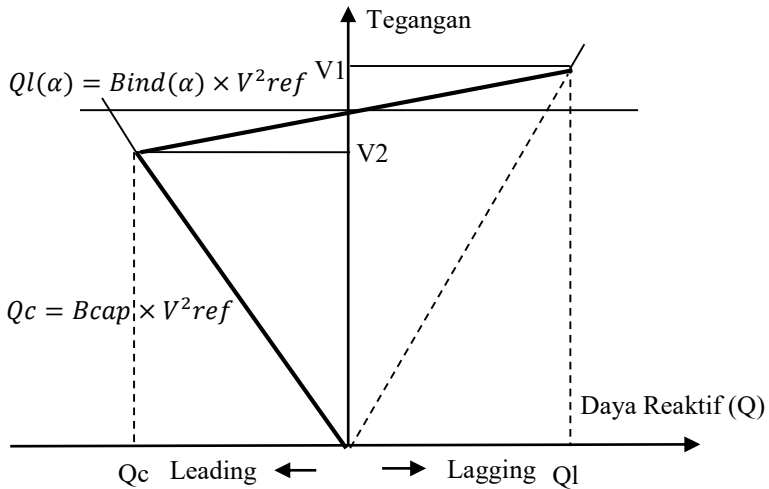
$$Q_{svc} = -V_1^2 \times B_{svc} \quad (2.4)$$

Dengan keseimbangan daya reaktif dengan tegangan (V_1) pada bus k berada pada *range*. nilai *range* tersebut mencakup nilai positif maupun negatif. Dan juga dari gambar 2.1(b), arus yang dialirkan oleh SVC adalah pada persamaan.

$$I_{svc} = jB_{svc} \times V_1 \quad (2.5)$$

SVC dapat digunakan untuk kompensasi yang bersifat induktif dan kapasitif. Pada kompensasi yang bersifat induktif, SVC menyerap kelebihan daya reaktif dari sistem sedangkan pada kompensasi yang bersifat kapasitif, SVC menginjeksikan daya reaktif ke sistem. Pada analisa aliran daya, SVC dapat dimodelkan sebagai injeksi daya reaktif ideal pada bus i melalui persamaan:

$$\Delta Q_i = Q_{svc} \quad (2.6)$$



Gambar 2.2 Kurva Daya Reaktif dan Tegangan pada SVC

Dimana: Q_c : Daya Reaktif Kapasitif (VAR)
 Q_l : Daya Reaktif Induktif (VAR)
 V : Tegangan (V)
 V_1 : Tegangan Mula-mula (V)
 V_2 : Tegangan Akhir (V)
 B : Suseptansi

3 area kerja SVC (*Static Var Compensator*) :

1. Area kerja pertama terdapat di antara V_1 dan V_2 . Di area ini, SVC bersifat kapasitif atau induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah-ubah sesuai kebutuhan sistem.
2. Area kerja kedua, bila tegangan bus melebihi V_1 . Di area ini SVC memiliki karakteristik induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah-ubah sesuai kebutuhan system.
3. Area kerja ketiga bila tegangan kurang dari V_2 . Di area ini SVC (*Static Var Compensator*) hanya berfungsi sebagai *fixed capacitor* saja

2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk tetap kembali beroperasi di titik keseimbangan saat dan setelah terjadi gangguan sehingga sistem tetap utuh. Definisi ini berlaku untuk sistem interkoneksi dengan generator tertentu atau grup generator. Sistem tenaga listrik memiliki variasi beban yang dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik harus tetap di suplai dengan daya yang sesuai. Apabila pada kondisi tertentu terjadi penurunan beban yang tidak terduga maka perubahan ini dikategorikan ke dalam gangguan pada sistem tenaga listrik yaitu kondisi tidak seimbang antara permintaan energi dan pasokan daya. Maka dari itu diperlukan analisis kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak lepas dari sistem.

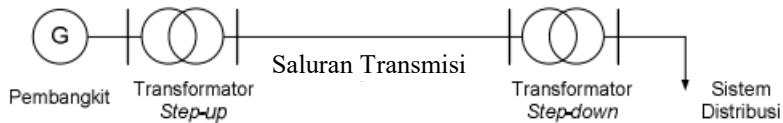
Kriteria utama stabilitas adalah bagaimana mesin-mesin mempertahankan sinkronisasi pada akhir periode transien. Jika respon osilasi sistem tenaga selama periode transien yang mengikuti gangguan teredam menuju kondisi operasi mantap, maka sistem dalam kategori stabil, jika tidak berarti sistem tidak stabil. Osilasi sistem mampu teredam berarti sistem itu mempunyai kekuatan dalam mengurangi osilasi dan hal ini yang sangat diperlukan bagi sistem tenaga. Batas stabilitas sistem adalah daya-daya maksimum yang mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas. Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas:

1. Stabilitas tetap (*steady state*).
adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil (fluktuasi beban).
2. Stabilitas peralihan (*transient*).
adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan (*swing*) pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis belum bekerja.
3. Stabilitas sub peralihan (dinamis).
adalah bila setelah ayunan pertama (periode stabilitas transient) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas *transient* bila AVR dan governor bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis).

2.3 Studi Aliran Daya[5]

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga komponen utama, yaitu : sitem pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi tenaga listrik, dan sistem distribusi tenaga listrik.

Komponen dasar yang membentuk suatu sistem tenaga listrik adalah generator, transformator, saluran transmisi dan beban. Untuk keperluan analisis sitem tenaga, diperlukan suatu diagram yang dapat mewakili setiap komponen sistem tenaga listrik tersebut. Diagram yang sering digunakan adalah diagram satu garis dan diagram impedansi atau diagram reaktansi. Gambar 2.3 merupakan diagram satu garis sistem tenaga listrik yang sederhana.

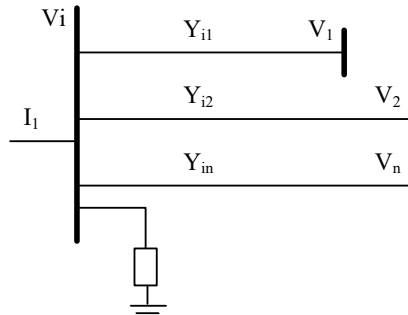


Gambar 2.3 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik bisa terdiri dari ratusan titik dan cabang dengan harga impedansi tertentu yang dinyatakan dalam satuan per unit dari MVA *base*. Persamaan sistem dapat dirumuskan secara sistematis dalam bentuk yang bermacam-macam. Umumnya, metode titik tegangan yang paling cocok dan sering digunakan dalam berbagai analisis aliran daya. Saat arus titik tersebut ditentukan, maka persamaan tersebut dapat diselesaikan menggunakan nilai tegangan titiknya.

2.3.1 Persamaan Aliran Daya

Sistem tenaga listrik tidak hanya terdiri dari dua bus, melainkan terdiri beberapa bus yang akan diinterkoneksi satu sama lain. Daya listrik yang diinjeksikan oleh generator kepada salah satu bus, bukan hanya dapat diserap oleh beban bus tersebut, melainkan dapat juga diserap oleh beban di bus yang lain. Kelebihan daya pada bus akan dikirimkan melalui saluran transmisi ke bus – bus lain yang kekurangan daya. Penggambaran bus secara umum pada suatu jaringan sistem tenaga listrik diberikan pada gambar berikut ini.



Gambar 2.4 Penggambaran Bus secara Umum

Berdasar hukum Kirchoff Arus, hubungan antara besar tegangan bus dan arus dinyatakan dalam persamaan titik tegangan.

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.7)$$

Persamaan di atas jika dinyatakan ke dalam bentuk matriks admitansi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Dimana :

n = jumlah total titik

Y_{11} = admitansi sendiri dari titik 1

Y_{21} = mutual admitansi dari titik 1 dan 2

V_1 = tegangan fasor pada titik 1

I_1 = arus fasor yang mengalir ke titik 1

Penerapan hukum Kirchoff arus pada sistem tersebut menghasilkan

$$\begin{aligned} I_i &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \end{aligned} \quad (2.9)$$

Atau

$$I_i = Vi \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad \neq 1 \quad (2.10)$$

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.11)$$

atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.12)$$

Substitusi nilai I_i pada 2.13 menghasilkan

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Vi \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq 1 \quad (2.13)$$

Persamaan aliran daya tersebut diselesaikan dengan menggunakan suatu proses pengulangan (iterasi) dengan menetapkan nilai-nilai perkiraan untuk tegangan pada bus yang tidak diketahui nilainya dan kemudian menghitung suatu nilai baru untuk setiap tegangan bus dari nilai perkiraan pada bus yang lain. Setiap perhitungan suatu himpunan nilai tegangan yang baru disebut sebagai satu iterasi. Proses iterasi ini diulang terus-menerus hingga perubahan yang terjadi pada setiap bus kurang dari nilai minimum atau tidak melebihi nilai maksimum yang telah ditentukan.

2.4 Metode *Newton Raphson*

Salah satu metode untuk menghitung aliran daya yang terjadi adalah metode *newton raphson*. Metode ini memiliki perhitungan lebih baik untuk sistem tenaga yang lebih besar dan tidak linier, karena lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang dibutuhkan sedikit untuk memperoleh pemecahan berdasarkan ukuran sistem.

Metode *Newton Raphson* dikembangkan dari Deret *Taylor* dengan mengabaikan derivatif pertama fungsi dengan satu variabel dari persamaan Deret *Taylor* berikut ini [6]:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle \delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.14)$$

Bagian riil dan imajiner dipisahkan sehingga persamaannya menjadi

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.15)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.16)$$

Bentuk matriks Jacobian dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Untuk elemen $\mathbf{J_1}$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.19)$$

Untuk elemen $\mathbf{J_2}$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq 1} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.21)$$

Untuk elemen $\mathbf{J_3}$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.23)$$

Untuk elemen $\mathbf{J_4}$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq 1} |V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.25)$$

$\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ adalah beda antara nilai yang dimasukkan dengan nilai yang dihitung yang disebut sebagai *power residual*.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{\text{sch}} - P_i^{(k)} \quad (2.26)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{\text{sch}} - Q_i^{(k)} \quad (2.27)$$

Estimasi tegangan bus yang baru adalah

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.28)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.29)$$

Proses iterasi akan berhenti jika sudah terpenuhi

$$\Delta |P_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (2.30)$$

$$\Delta |Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (2.31)$$

Arus pada saluran dinyatakan sebagai berikut.

$$I_{ij} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0} V_i \quad (2.32)$$

Daya komplek S_{ij} dari bus i ke bus j dinyatakan sebagai berikut.

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.33)$$

2.5 Besaran Per Unit (PU)

Besaran sistem dalam satuan masing-masing, ditransformasikan ke dalam besaran tak berdimensi yaitu per-unit (disingkat pu). Nilai per-unit dari suatu besaran merupakan rasio dari besaran tersebut dengan suatu besaran basis. Besaran basis ini berdimensi sama dengan dimensi

besaran aslinya sehingga nilai per-unit besaran itu menjadi tidak berdimensi[6]

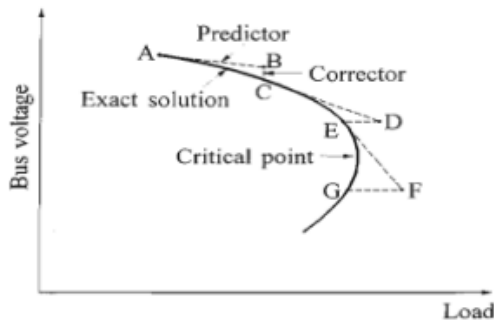
$$\text{Besaran per unit} = \frac{\text{Besaran sesungguhnya}}{\text{Besaran dasar yang berdimensi sama}}$$

Nilai sesungguhnya berupa bilangan kompleks, namun nilai basis yang ditetapkan adalah bilangan nyata. Oleh karena itu sudut fasa nilai dalam per-unit sama dengan sudut fasa sesungguhnya.

2.6 Continuation Power Flow (CPF)[7]

Matrix Jacobian pada persamaan aliran daya menjadi singular saat mencapai batas stabilitas tegangan, sehingga perhitungan aliran daya tidak menghasilkan solusi pada titik runtuh. Dalam keadaan seperti ini, digunakan analisis *continuation power flow* (CPF).

Pada Gambar 2.5 terlihat bahwa solusi awal adalah A, kemudian titik B didapat oleh tangent predictor dengan kenaikan beban. *Corrector step* akan menemukan solusi C dengan analisis aliran daya konvensional dengan asumsi beban tetap. Nilai tegangan akibat kenaikan beban kemudian diprediksi kembali dengan tangent yang baru. Apabila solusi yaitu D melebihi beban maksimum, maka *corrector step* dengan beban tetap tidak akan konvergen. *Predictor step* akan mencari solusi E dengan tegangan tetap pada bus yang bersangkutan. Maka akan tercapai suatu titik dengan beban maksimum dan akan berangsur-angsur turun .



Gambar 2.5 Skema Prediktor dan Korektor pada *Continuation Power Flow*

Metode CPF dilakukan dengan reformulasi persamaan aliran daya melalui penambahan parameter pembebanan, yang diekspresikan sebagai berikut:

$$F(\theta, V) = \lambda K \quad (2.34)$$

dimana: λ = parameter beban

θ = vektor dari sudut tegangan bus

V = vektor dari besar tegangan bus

K = vektor yang menggambarkan persentase perubahan beban pada tiap bus

Persamaan (2.34) merupakan persamaan *non linear* dengan spesifikasi $0 \leq \lambda \leq \lambda_{critical}$. Dengan $\lambda = 0$ adalah kondisi pembebanan awal, dan $\lambda = \lambda_{critical}$ saat kondisi pembebanan kritis. Persamaan (2.34) dapat ditulis kembali sehingga menghasilkan (2.35):

$$F(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (2.35)$$

Pada *predictor step*, pendekatan linear digunakan untuk menghitung solusi selanjutnya dengan perubahan dari salah satu *state variable* (θ , V , atau λ). Dari persamaan (2.35), dapat ditulis persamaan linear seperti pada (2.36) dan (2.37) sebagai berikut:

$$F_{\theta}d\theta + F_vdV + F_{\lambda} = 0 \quad (2.36)$$

atau

$$[F_{\theta} \ F_v \ F_{\lambda}] \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (2.37)$$

Dengan penambahan λ pada persamaan aliran daya akan menimbulkan suatu variabel yang tidak diketahui, maka perlu penambahan satu lagi persamaan untuk menemukan solusinya. *Tangent vector* yang bernilai +1 atau -1 akan ditambahkan, parameter ini sering disebut dengan *continuation parameter*. Persamaan (2.37) akan menjadi :

$$\begin{bmatrix} F_\theta & F_v & F_\lambda \\ ek \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Pada persamaan (2.38), dimana ek merupakan vektor baris dengan semua elemen sama dengan nol kecuali untuk elemen ke k^{th} yang bernilai 1. Ketika *tangent vector* telah didapat, prediksi untuk solusi selanjutnya dituliskan seperti persamaan (2.39):

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Dengan penanda "0" adalah nilai dari *state variable* saat memulai *predictor step*. Nilai dari *step size* atau disimbolkan dengan σ ditentukan sehingga solusi aliran daya akan muncul pada nilai *continuation parameter* tertentu. Pada *corrector step*, persamaan $(\theta, V, \lambda) = 0$ diberi tambahan satu persamaan untuk *state variable* sebagai *continuation parameter*. Maka didapatkan persamaan baru:

$$\begin{bmatrix} F(\theta, V, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \quad (2.40)$$

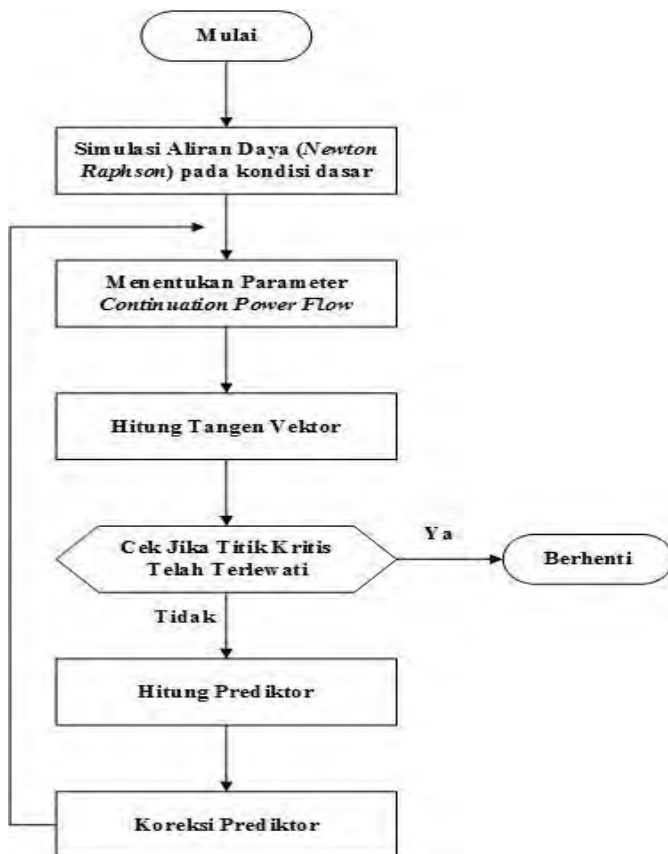
Pada persamaan (2.40), X_k adalah *state variable* yang dipilih sebagai *continuation parameter* dan η bernilai sama dengan nilai X_k yang diprediksi. Adanya x_k membuat Jacobian tidak singular pada titik kritis operasi, sehingga analisis CPF dapat dilanjutkan dibawah untuk nilai titik kritis.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB III

LANGKAH-LANGKAH METODE CONTINUATION POWER FLOW

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai bagaimana metode *continuation power flow* dapat mengetahui masalah ketidakstabilan pada sistem tenaga dengan menggunakan sistem Jawa Bali 500kV sebagai studi kasusnya. Metode ini disimulasikan menggunakan software matlab.



Gambar 3.1 Diagram Alir *Continuation power flow*

Metode *continuation power flow* ini terbagi menjadi beberapa langkah berikut ini;

- Langkah I : Simulasi aliran daya pada kondisi awal dengan menggunakan newton raphson.
- Langkah II : Menentukan parameter continuation.
- Langkah III : Menghitung tangen vektor.
- Langkah IV : Memeriksa titik kritis.
- Langkah V : Menghitung Prediktor.
- Langkah VI : Koreksi prediktor.

3.1. Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya pada kondisi awal digunakan untuk mengetahui nilai dari matriks jacobian dan persamaan aliran dayanya. Dari persamaan aliran daya tersebut dimasukkan parameter continuation berupa lambda yang merepresentasikan seberapa besar kenaikan beban sehingga dapat ditulis sebagai berikut;

$$\Delta P = P_{Gi}(\lambda) - P_{Li}(\lambda) - P_{Ti}(\lambda) = 0 \quad (3.1)$$

$$\Delta Q = Q_{Gi}(\lambda) - Q_{Li}(\lambda) - Q_{Ti}(\lambda) = 0 \quad (3.2)$$

Dimana;

$$P_{Ti} = \sum_{j=i}^n V_i V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (3.3)$$

$$Q_{Ti} = \sum_{j=i}^n V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (3.4)$$

Dari persamaan daya aktif dan reaktif diatas dapat menghasilkan matriks jacobian. Elemen matriks jacobian memberikan informasi mengenai sensitifitas antara aliran daya dan perubahan tegangan. Sehingga untuk kondisi awal dihasilkan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial v} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \delta} & \frac{\partial f_2}{\partial v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Elemen matriks jacobian diatas akan ditambahkan nilai perubahan daya aktif dan reaktif akibat adanya perubahan beban dari nilai lambda. Dengan ditambahi juga nilai pada baris terakhir berupa e_k . Dimana e_k ini merupakan dimensi garis vektor dengan semua elemennya bernilai

nol kecuali k^{th} yang bernilai satu. Sehingga bisa diekspresikan sebagai berikut;

$$J_{aug} = \begin{bmatrix} J_0 & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \delta} & \frac{\partial f_1}{\partial V} & \frac{\partial f_1}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \delta} & \frac{\partial f_2}{\partial V} & \frac{\partial f_2}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.2. Parameter Continuation Power Flow

Metode CPF dilakukan dengan reformulasi persamaan aliran daya melalui penambahan parameter pembebanan, yang diekspresikan sebagai berikut :

$$F(\theta, V) = \lambda K \quad (3.7)$$

dimana:

λ = Parameter beban

θ = Vektor dari sudut tegangan bus

V = Vektor dari besar tegangan bus

K = Vektor yang menggambarkan persentase perubahan beban pada tiap bus

Persamaan (3.6) merupakan persamaan non linear dengan spesifikasi $0 \leq \lambda \leq \lambda_{critical}$. Dengan $\lambda = 0$ adalah kondisi pembebanan awal, dan $\lambda = critical$ saat kondisi pembebanan kritis. Persamaan (3.7) dapat ditulis kembali sehingga menghasilkan persamaan (3.8)

$$F(\theta, V) = 0 \quad (3.8)$$

3.3. Menghitung Tangen Vektor

Setelah diketahui nilai dari matriks jacobian augmentation nya, maka berikutnya adalah mencari tangen vektor yang merupakan arah daripada berjalannya lintasan aliran daya kurva P-V. Tangen vektor tersebut dapat direpresentasikan dengan persamaan:

$$J_{aug} * t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

Dimana tangen vektor = $\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix}$, sehingga persamaannya menjadi :

$$J_{aug} * \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

3.4. Menghitung Prediktor dan Menentukan Titik Kritis

Dari nilai tangen vektor yang sudah didapatkan, maka langkah berikutnya adalah menghitung prediktor pada iterasi pertama dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{bmatrix} \delta^{k+1} \\ V^{k+1} \\ \lambda^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^k \\ V^k \\ \lambda^k \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta^k \\ dV^k \\ d\lambda^k \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Persamaan diatas nilai σ merupakan size step dari prediktor. Pada langkah ini stepsize ditentukan 0.1 pu untuk kenaikan dan penurunan nilai lambda, sedangkan ketika mencapai titik kritis nilai stepsizenya diperkecil menjadi 0.025 pu. Berdasarkan hasil prediktor diatas, maka bisa dicari solusi dari prediktor dengan menghitung nilai daya reaktif dari persamaan aliran daya dengan memasukkan nilai δ , V , dan λ yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut;

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta^{k+1} \\ \Delta V^{k+1} \\ \Delta\lambda^{k+1} \end{bmatrix} = -J_{aug}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.5. Koreksi Prediktor

Langkah terakhir yakni dengan memasukkan nilai perubahan sudut tegangan, magnitude tegangan, dan lambda untuk mengetahui nilai korektor menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \delta^{k+1} \\ V^{k+1} \\ \lambda^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{k+1} \\ V^{k+1} \\ \lambda^{k+1} \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} \Delta\delta^{k+1} \\ \Delta V^{k+1} \\ \Delta\lambda^{k+1} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Dari langkah tersebut dapat diketahui nilai dari $\begin{bmatrix} \delta^{k+1} \\ \nu^{k+1} \\ \lambda^{k+1} \end{bmatrix}$ dan dengan toleransi 10^{-5} jika telah memenuhi batas toleransi maka langkah akan dihentikan. Namun jika nilai akhirnya belum memenuhi nilai dari toleransi akan dilakukan iterasi ulang sampai akhirnya mencapai nilai dengan toleransi yang sama atau mendekati.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS PENENTUAN LOKASI OPTIMAL SVC MENGGUNAKAN METODE *CONTINUATION POWER FLOW*

Pada bab ini akan dilakukan simulasi serta analisis dari hasil program *continuation power flow* untuk menentukan lokasi optimal pemasangan SVC pada jaringan sistem tenaga listrik 500kV Jawa Bali. Simulasi dilakukan bertujuan untuk memperoleh nilai lambda maksimum atau batas titik kritis dari penambahan beban pada setiap bus yang mana diberikan di bus beban secara bergantian. Dari nilai lambda tersebut akan diketahui berapa besar perubahan nilai tegangan yang masih mampu ditanggung oleh masing-masing bus dan ditampilkan dalam bentuk kurva *nose*. Dari kurva tersebut dapat diketahui bus yang rentan oleh perubahan beban.

4.1. Data Jawa Bali 500kV

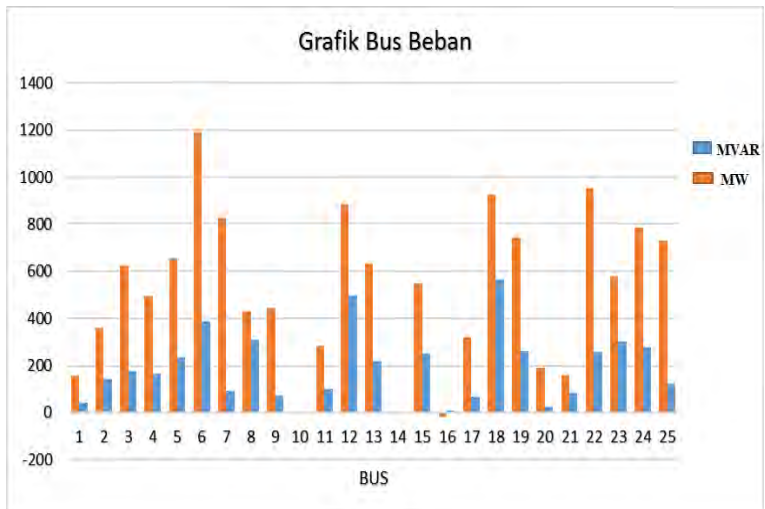
Sistem tenaga listrik Jawa Bali 500kV, 25 bus terdiri atas 1 bus *slack*, 7 bus generator, dan 17 bus beban. Data Jawa Bali yang digunakan adalah data pembebanan pada hari Minggu tanggal 16 Oktober 2011 pukul 18.00 WIB. Pada tabel 4.1.1 menunjukkan data bus beban dan generator dari sistem Jawa Bali 500kV. Terdapat beberapa kode bus yang dilambangkan dengan angka, bus data dengan kode nomor 1 merupakan tipe bus beban, bus dengan kode nomor 2 merupakan tipe bus generator, dan bus dengan kode nomor 3 merupakan tipe bus *slack*.

Tabel 4.1.1 Data Bus Sistem Jawa Bali 500kV

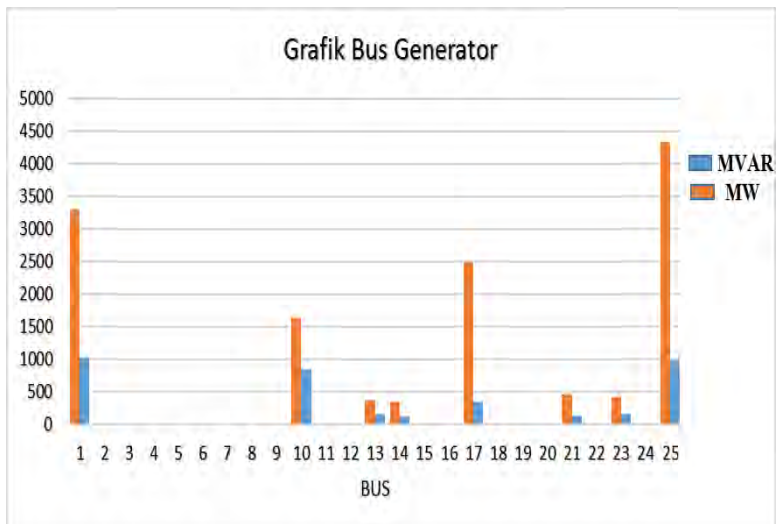
Lokasi bus	No	Kode	Beban		Generator	
	Bus	bus	MW	MVAR	MW	MVAR
Suralaya	1	3	155	43	3298.35	1023.3
Cilegon	2	1	358	144	0	0
Cawang	3	1	626	177	0	0
Balaraja	4	1	495	166	0	0
Kembangan	5	1	660	236	0	0

Lanjutan Tabel

Lokasi bus	No Bus	Kode bus	Beban		Generator	
			MW	MVAR	MW	MVAR
Bekasi	6	1	1192	390	0	0
Gandul	7	1	827	91	0	0
Cibinong	8	1	431	308	0	0
Depok	9	1	444	73	0	0
Muara Tawar	10	2	0	0	1724.56	888.77
Tasikmalaya	11	1	283	101	0	0
Cibatu	12	1	888	496	0	0
Cirata	13	2	633	221	283	114
Saguling	14	2	0	0	349.41	125.33
Bandung Selatan	15	1	548	250	0	0
Mandiracan	16	1	-19	9	0	0
Tanjung Jati	17	2	321	65	2487	356
Ungaran	18	1	924	565	0	0
Pedan	19	1	744	262	0	0
Ngimbang	20	1	191	25	0	0
Gresik	21	2	160	82	455.95	146.53
Surabaya Barat	22	1	954	256	0	0
Grati	23	2	576	303	420.36	150.41
Kediri	24	1	785	279	0	0
Paiton	25	2	729	123	4326.36	970.08



Gambar 4.1.1 Grafik Bus Beban dalam MW dan MVAR



Gambar 4.1.2 Grafik Pembangkitan Generator dalam MW dan MVAR

Gambar 4.1.1 menunjukkan perbandingan antara daya aktif (MW) dengan daya reaktifnya (MVAR) di bus beban, sedangkan gambar 4.1.2 menunjukkan perbandingan pembangkitan daya aktif (MW) dan daya reaktif (MVAR) pada generator dimana sumbu-x menyatakan nomor bus dan sumbu-y menyatakan besarnya nilai daya aktif maupun daya reaktif. Pada tabel 4.1.2 menunjukkan data saluran pada sistem Jawa Bali 500kV dimana nilai resistansi (R) dan reaktansi (X) dalam bentuk per unit (PU) dengan nilai Base MVA sebesar 1000 MVA dan tegangan sebesar 500 KV.

Tabel 4.1.2 Data Resistansi dan Reaktansi pada Saluran Sistem Jawa Bali 500kV.

Dari bus -	Ke bus -	R (PU)	X (PU)	$\frac{1}{2} B$ (PU)
1	2	0.000626496	0.007008768	0.00000010
1	4	0.003677677	0.035333317	0.00000052
2	8	0.013133324	0.146925792	0.00000106
6	8	0.001513179	0.016928308	0.00000031
6	3	0.000694176	0.006669298	0.00000014
7	4	0.004441880	0.042675400	0.00000037
7	5	0.006211600	0.059678000	0.00000024
8	14	0.004111380	0.045995040	0.00000065
9	8	0.001973648	0.018961840	0.00000011
9	7	0.005625600	0.054048000	0.00000006
10	8	0.002822059	0.027112954	0.00000041
10	3	0.002739960	0.026324191	0.00000033

Lanjutan Tabel

Dari bus -	Ke bus -	R (PU)	X (PU)	½ B (PU)
11	9	0.001474728	0.014168458	0.00000223
12	13	0.001957800	0.021902400	0.00000037
12	10	0.006990980	0.067165900	0.00000039
14	15	0.013478000	0.129490000	0.00000030
14	13	0.013533920	0.151407360	0.00000020
16	15	0.015798560	0.151784800	0.00000096
16	18	0.009036120	0.086814600	0.00000180
18	19	0.001394680	0.013399400	0.00000061
18	20	0.003986382	0.044596656	0.00000167
18	17	0.000818994	0.007868488	0.00000109
19	24	0.014056000	0.157248000	0.00000164
19	11	0.015311000	0.171288000	0.00000246
20	22	0.010291000	0.115128000	0.00000038
21	22	0.010291000	0.115128000	0.00000019
22	18	0.004435823	0.049624661	0.00000215
22	23	0.002979224	0.028622920	0.00000075
25	23	0.023479613	0.225580588	0.00000071
25	24	0.005966652	0.057324466	0.00000169

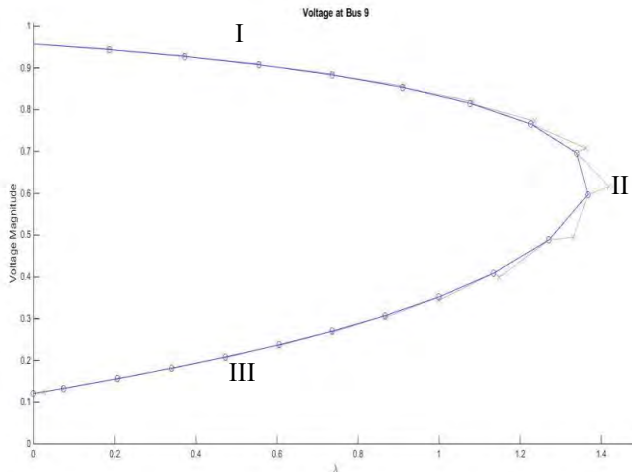


4.2. *Continuation Power Flow* pada Sistem Jawa Bali 500kV

Data sistem Jawa Bali diatas dapat dilakukan simulasi dengan metode *continuation power flow*. Metode ini disimulasi pada software matlab. Hasil dari program metode *continuation power flow* ini berupa data nilai dari tegangan (V), sudut tegangan (δ), dan faktor pembebanan (λ).

Pada simulasi ini dilakukan penambahan beban pada semua bus beban. Salah satu bus beban akan diberi penambahan beban dan dilambangkan sebagai lambda (λ). Penambahan beban tersebut terus dilakukan pada setiap iterasinya hingga kondisi bus tersebut akan mencapai titik kritisnya. Titik kritis ini merupakan batas beban maksimum yang mampu ditanggung oleh bus tersebut. Selain itu kenaikan beban pada salah satu bus juga akan mempengaruhi nilai titik kritis atau batas kenaikan beban maksimum pada bus-bus beban yang lainnya juga. Disini pada setiap penambahan beban misalkan pada bus beban 2 (Cilegon), maka kenaikan beban maksimum semua bus akan ditanggung oleh 8 bus generator yang terdapat pada bus Suralaya, Muara Tawar, Cirata, Saguling, Tanjung Jati, Gresik, Grati, dan Paiton. Oleh karena itu selain mencari lambda maksimum maupun nilai dari beban maksimum tiap bus, juga bisa dihitung berapa besar pembangkitan seharusnya dari setiap bus generator dengan memanfaatkan nilai lambda.

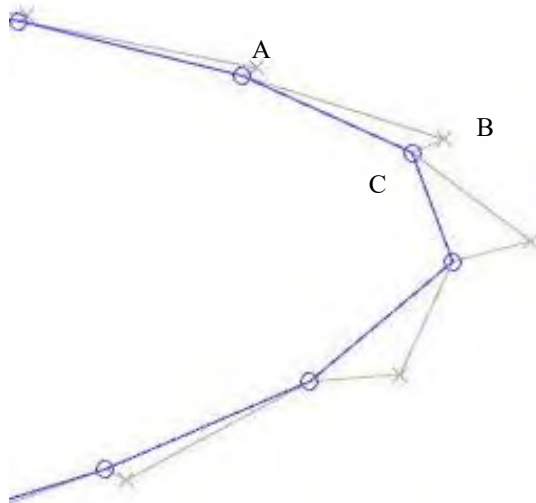
Dalam simulasi ini perlu diketahui adanya istilah *tangen vektor* dan *size step*. Pada dasarnya metode ini menggunakan sistem prediktor dan korektor dimana pada titik masing-masing prediktor dan korektor akan diketahui nilai dari tegangan, sudut tegangan, dan lambdanya. *Tangen vektor* disini digunakan untuk mengetahui ke arah mana titik prediktor ini akan bergerak pada setiap percabangan. Sedangkan *size step* disini digunakan untuk mengetahui seberapa jauh jarak atau perubahan pada titik prediktor maupun korektor tersebut. *Size step* dalam simulasi ini digunakan 0.1 pu. Hasil program dalam simulasi akan divalidasi menggunakan *toolbox Matpower 5.1*



Gambar 4.2.1 Kurva *Nose* untuk Analisa Kestabilan Tegangan

Untuk gambar 4.2.1 sendiri menerangkan tentang grafik P-V berbentuk *nose curve* untuk menganalisa kestabilan daripada bus-bus yang akan diberi penambahan beban hingga mencapai batas kritisnya. Pada *nose curve* tersebut dibagi menjadi tiga bagian atau daerah. Yang pertama adalah daerah yang diberi tanda I bisa disebut sebagai fase pertama. Pada fase pertama ini kondisi bus masih dalam batas kemampuan kestabilannya. Daerah dengan tanda II disebut fase kedua atau daerah *turning point*. Yang dimaksud dengan turning point disini adalah daerah atau kondisi dimana hasil dari iterasi pada fase pertama telah mendekati nilai toleransi yakni 10^{-5} . Mendekati nilai toleransi ini nilai aliran daya pada iterasinya akan mengalami masalah atau bahkan kegagalan untuk konvergen. Oleh karena itu pada fase kedua ini parameter yang semula adalah lambda (λ) diganti menjadi nilai tegangannya (V). Nilai *step size* tegangan adalah 0,025 pu. Iterasi pada fase kedua ini tidak banyak, sehingga saat iterasi fase kedua ini mendekati batas toleransi sebesar 10^{-5} , maka parameter diganti seperti semula menjadi lambda (λ). Daerah yang ditandai dengan C merupakan fase ketiga dimana nilai lambdanya mengalami penurunan disertai dengan penurunan tegangan. Kondisi fase ketiga ini bisa disebut sebagai daerah ketidakstabilan bus. Fase pertama, kedua, dan ketiga ini berbeda-

beda untuk masing-masing bus beban bergantung dari respon bus tersebut.



Gambar 4.2.2 Prediktor-Korektor pada Kurva *Nose*

Jika diperbesar gambar 4.2.1 bagian kurva *nose*, maka bisa dilihat prediktor dan korektor. Garis yang berwarna merah merupakan lintasan prediktor, sedangkan garis yang berwarna biru merupakan lintasan korektor. Titik A merupakan titik awal atau hasil dari prediktor pada iterasi sebelumnya. Titik B pada gambar diatas menunjukkan titik prediksi yang ada pada prediktor dengan menggunakan *tangen vektor* sebagai arah Bergeraknya. Titik C merupakan koreksi daripada titik B yang akan menjadi salah satu titik korektor. Titik C tersebut akan menjadi nilai awal untuk iterasi berikutnya.

4.3. Kenaikan Beban

Dari nilai λ yang dihasilkan, maka dapat diketahui berapa besar nilai beban aktif maksimum yang dapat ditampung oleh setiap bus pada masing-masing penambahan beban dengan menggunakan persamaan :

$$P_{Li}(\lambda) = P_{Li0} [1 + \lambda] \quad (4.1)$$

Dimana ;

$P_{Li}(\lambda)$ = nilai beban nyata maksimum akibat pembebanan pada bus-i

P_{Li} = nilai beban nyata pada kondisi awal

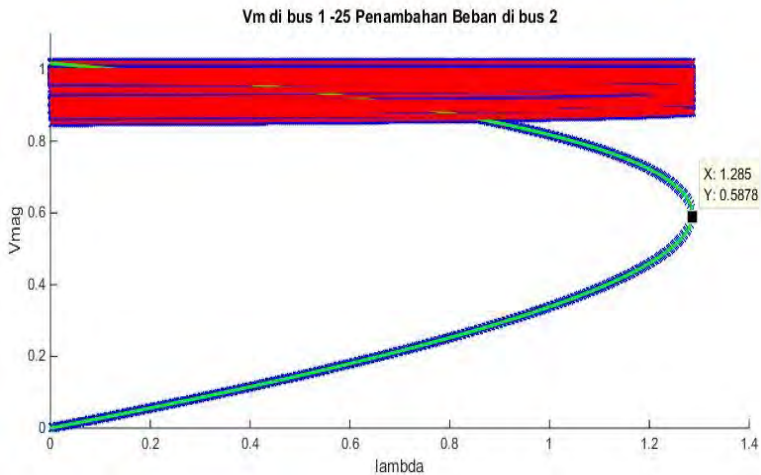
λ = nilai faktor pembebanan

4.4. Hasil Simulasi

4.4.1. Penambahan Beban pada Bus Beban

Penambahan beban hingga mencapai titik kritis di berikan pada semua bus beban.

1. Penambahan pada bus beban 2 (Cilegon)

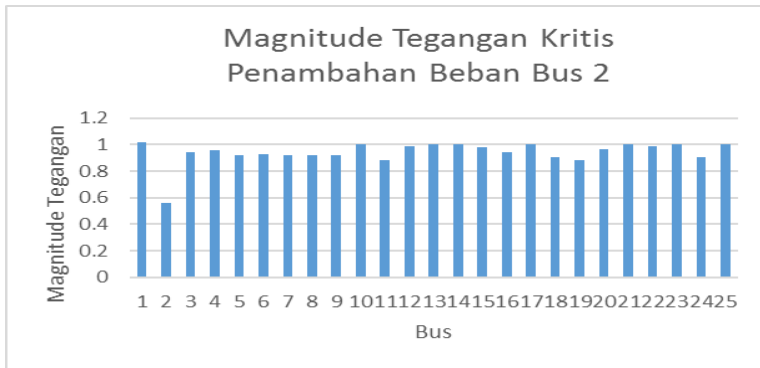


Gambar 4.4.1.1 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 2 (Cilegon)

Gambar 4.4.1.1 terlihat bahwa kurva bus 2 (Cilegon) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan. Setelah itu runtuh tegangan bisa saja terjadi sewaktu-waktu.

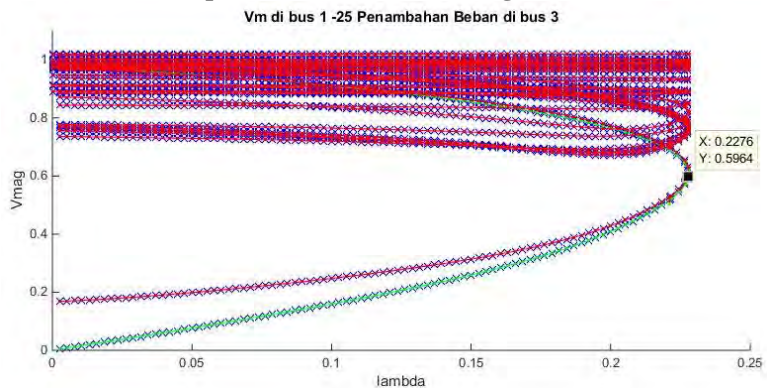
Tabel 4.4.1.1 Tabel Data Bus 2 Saat Penambahan Beban pada Bus 2

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Cilegon (2)	1.285168	0.5628	489	1	487



Gambar 4.4.1.2 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 2 (Cilegon)

2. Penambahan pada bus beban 3 (Cawang)

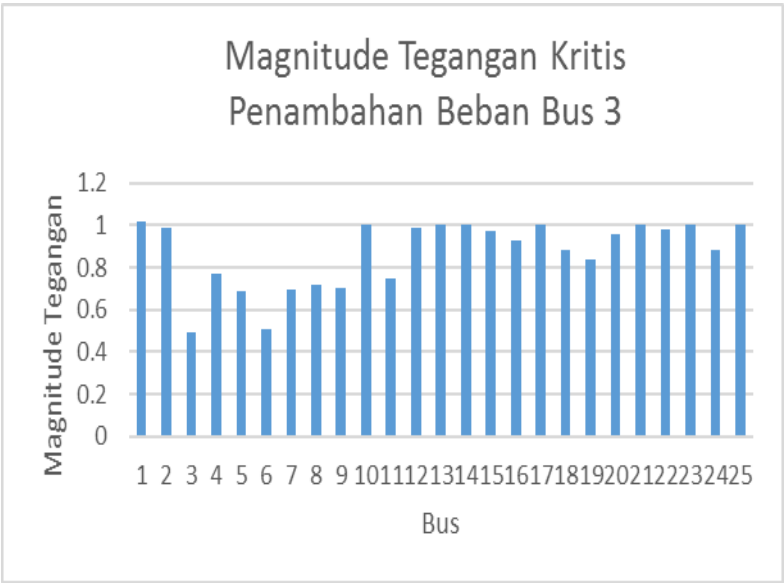


Gambar 4.4.1.3 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 3 (Cawang)

Gambar 4.4.1.3 terlihat bahwa kurva bus 3 (Cawang) memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

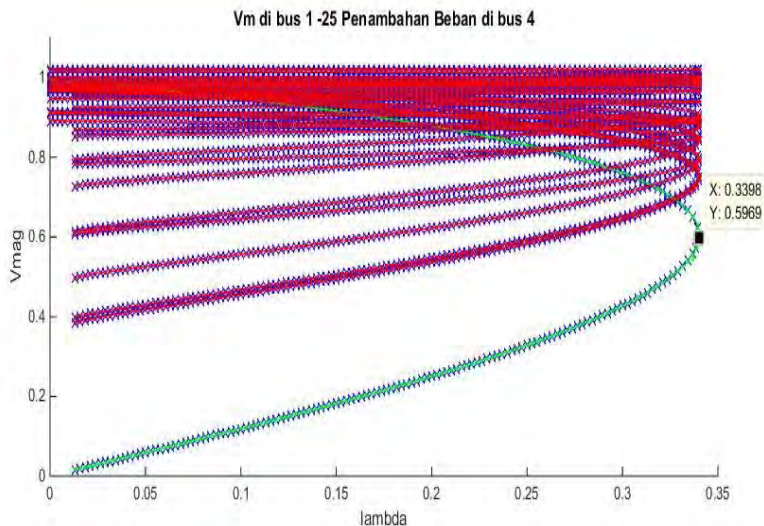
Tabel 4.4.1.2 Tabel Data Bus 3 Saat Penambahan Beban pada Bus 3

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Cawang (3)	0.227588	0.4964	86	6	84



Gambar 4.4.1.4 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 3 (Cawang)

3. Penambahan pada bus beban 4 (Balaraja)

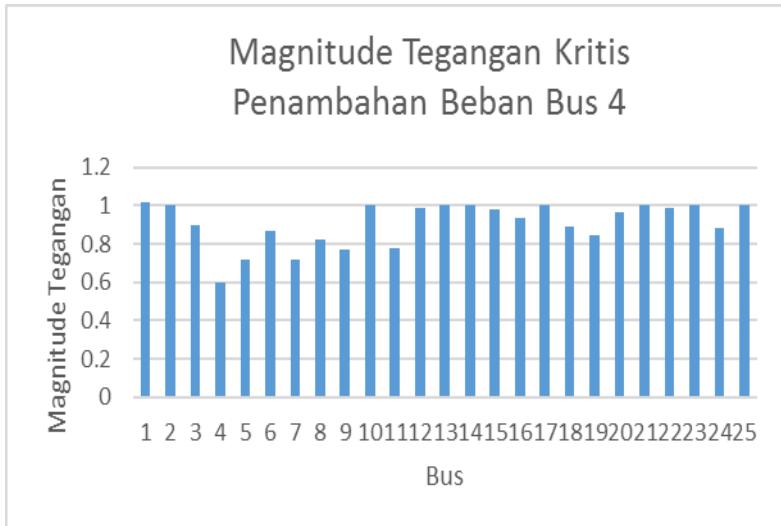


Gambar 4.4.1.5 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 4 (Cawang)

Gambar 4.4.1.5 terlihat bahwa kurva bus 4 (Balaraja) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

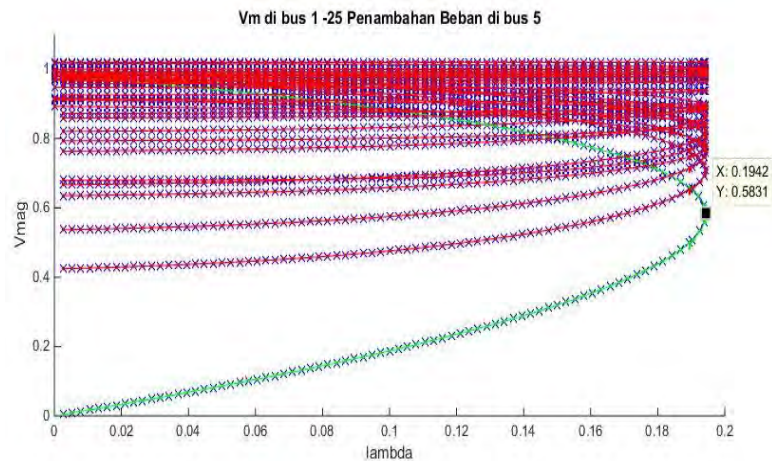
Tabel 4.4.1.3 Tabel Data Bus 4 Saat Penambahan Beban pada Bus 4

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Balaraja (4)	0.339807	0.5969	130	2	124



Gambar 4.4.1.6 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 4 (Balaraja)

4. Penambahan pada bus beban 5 (Kembangan)

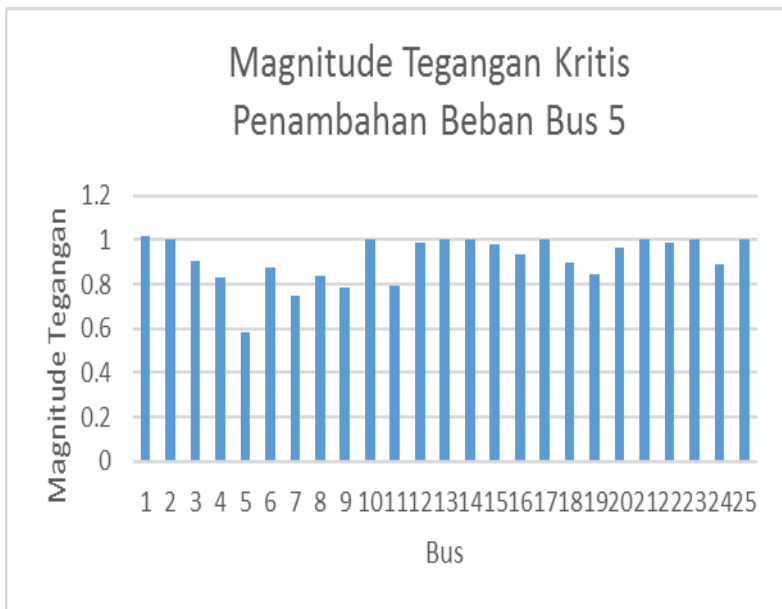


Gambar 4.4.1.7 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 5 (Kembangan)

Gambar 4.4.1.7 terlihat bahwa kurva bus 5 (Kembangan) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

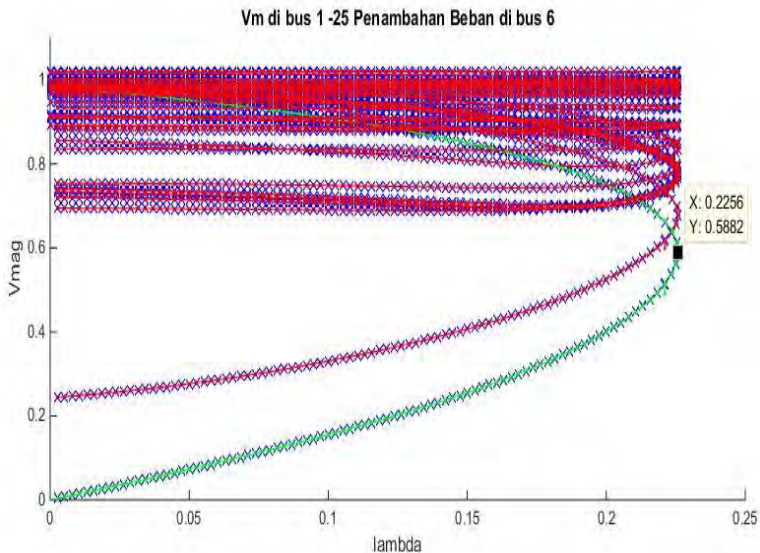
Tabel 4.4.1.4 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 5

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Kembangan (5)	0.194249	0.5831	74	5	72



Gambar 4.4.1.8 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 5 (Kembangan)

5. Penambahan pada bus beban 6 (Bekasi)

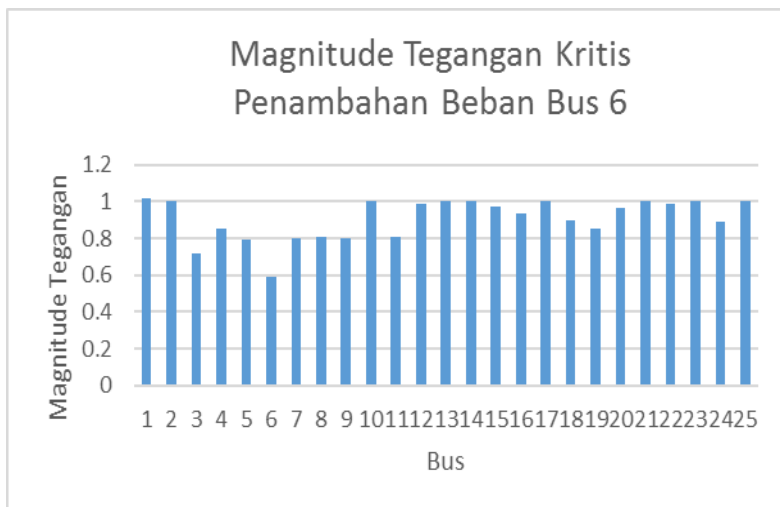


Gambar 4.4.1.9 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 6 (Bekasi)

Gambar 4.4.1.9 terlihat bahwa kurva bus 6 (Bekasi) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

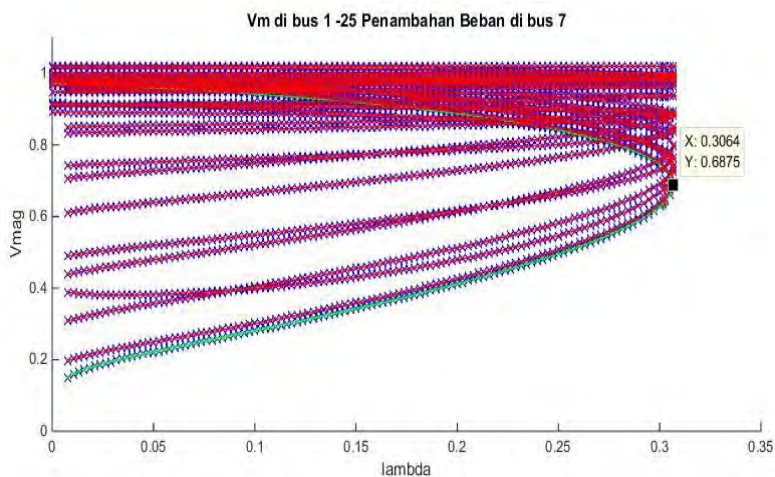
Tabel 4.4.1.5 Tabel Data Bus 6 Saat Penambahan Beban pada Bus 6

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Bekasi (6)	0.225615	0.5882	86	5	84



Gambar 4.4.1.10 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 6 (Bekasi)

6. Penambahan pada bus beban 7 (Gandul)

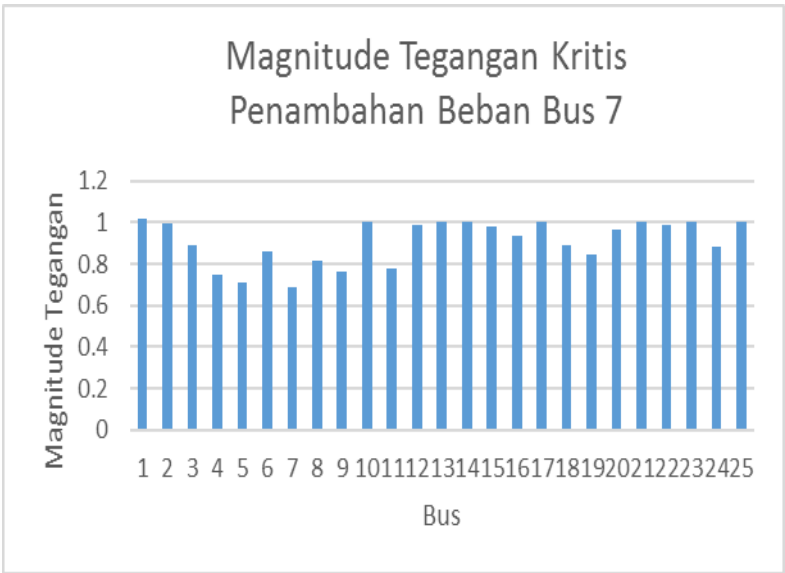


Gambar 4.4.1.11 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 7 (Gandul)

Gambar 4.4.1.11 terlihat bahwa kurva bus 7 (Gandul) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

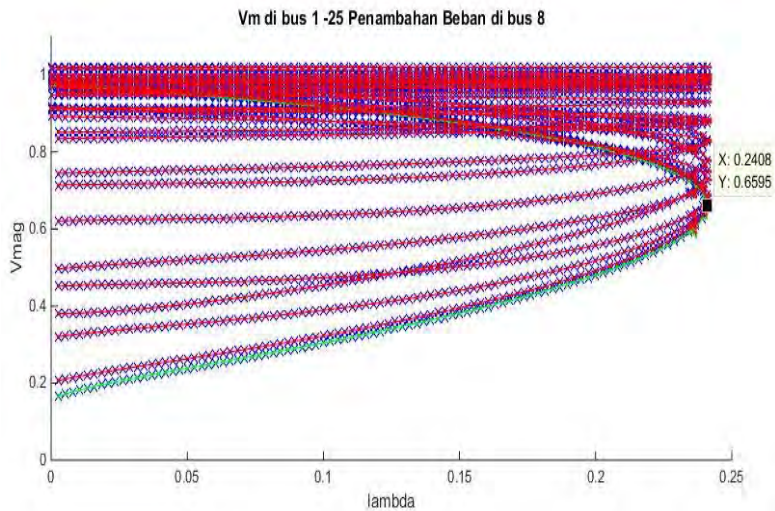
Tabel 4.4.1.6 Tabel Data Bus 7 Saat Penambahan Beban pada Bus 7

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Gandul (7)	0.306397	0.6875	117	3	113



Gambar 4.4.1.12 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 7 (Gandul)

7. Penambahan pada bus beban 8 (Cibinong)

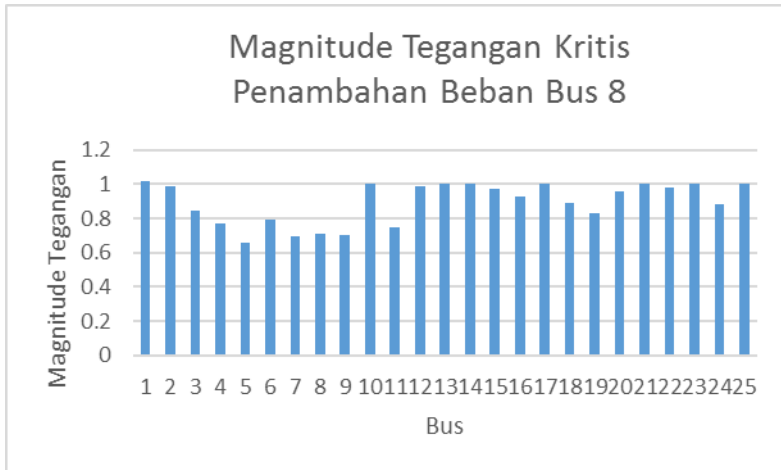


Gambar 4.4.1.13 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 8 (Cibinong)

Gambar 4.4.1.13 terlihat bahwa kurva bus 5 (Kembangan) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

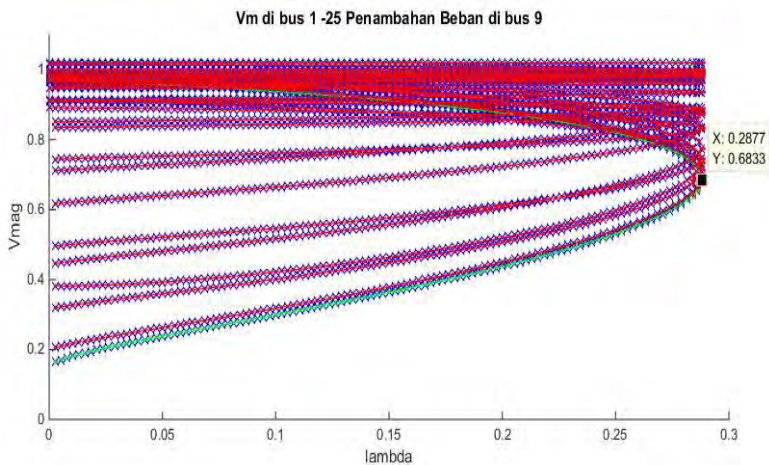
Tabel 4.4.1.7 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 8

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Kembangan (5)	0.240804	0.6596	92	3	90



Gambar 4.4.1.14 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 8 (Cibinong)

8. Penambahan pada bus beban 9 (Depok)

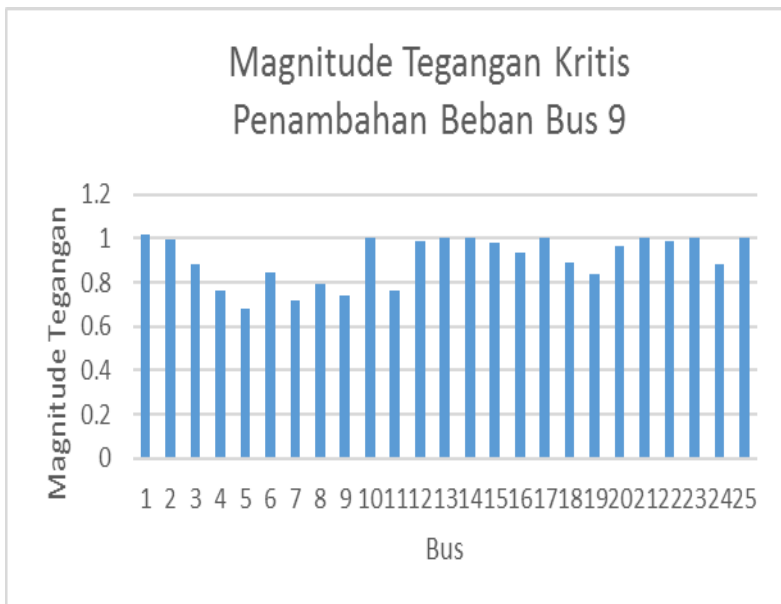


Gambar 4.4.1.15 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 9 (Depok)

Gambar 4.4.1.15 terlihat bahwa kurva bus 5 (Kembangan) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

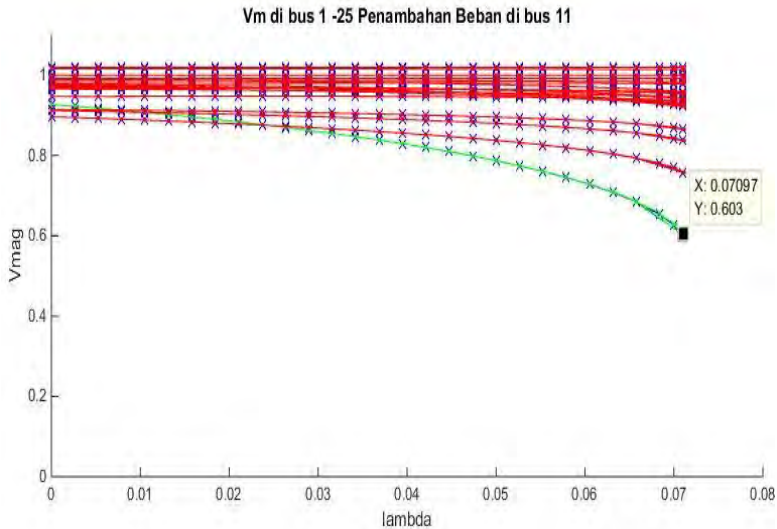
Tabel 4.4.1.8 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 9

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Kembangan (5)	0.287738	0.6833	110	2	108



Gambar 4.4.1.16 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 9 (Depok)

9. Penambahan pada bus beban 11 (Tasikmalaya)

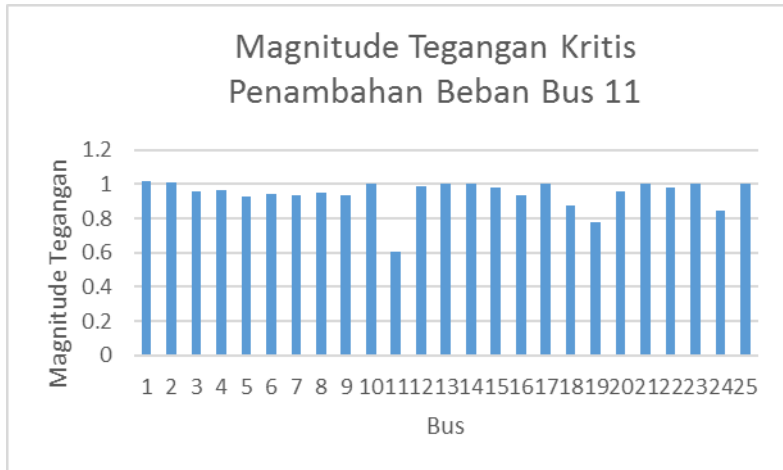


Gambar 4.4.1.17 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 11 (Tasikmalaya)

Gambar 4.4.1.17 terlihat bahwa kurva bus 11 (Tasikmalaya) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

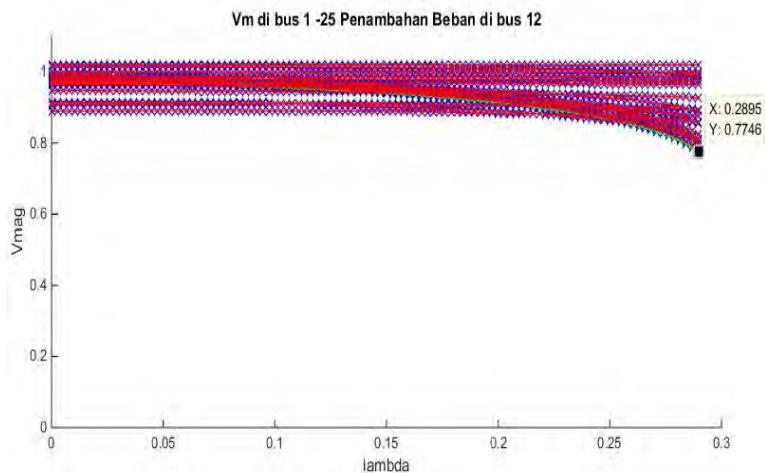
Tabel 4.4.1.9 Tabel Data Bus 11 Saat Penambahan Beban pada Bus 11

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Tasikmalaya (11)	0.070972	0.603	27	2	25



Gambar 4.4.1.18 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 11 (Tasikmalaya)

10. Penambahan pada bus beban 12 (Cibatu)

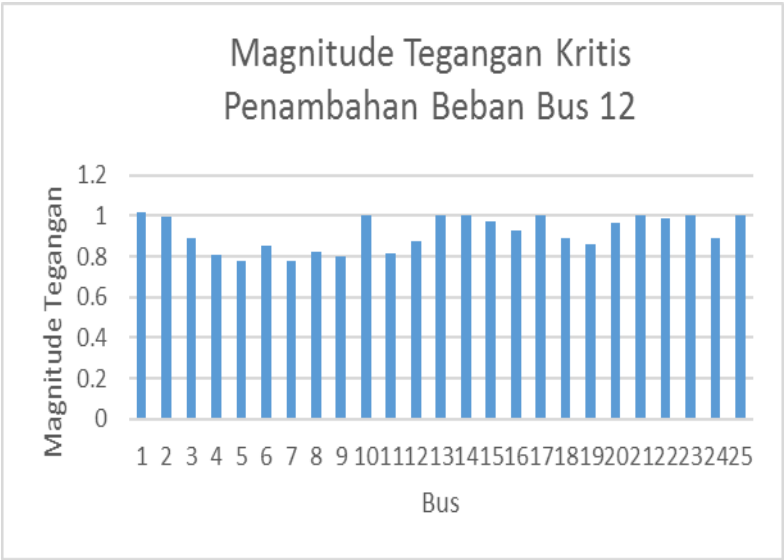


Gambar 4.4.1.19 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 12 (Cibatu)

Gambar 4.4.1.19 terlihat bahwa kurva bus 5 (Kembangan) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan

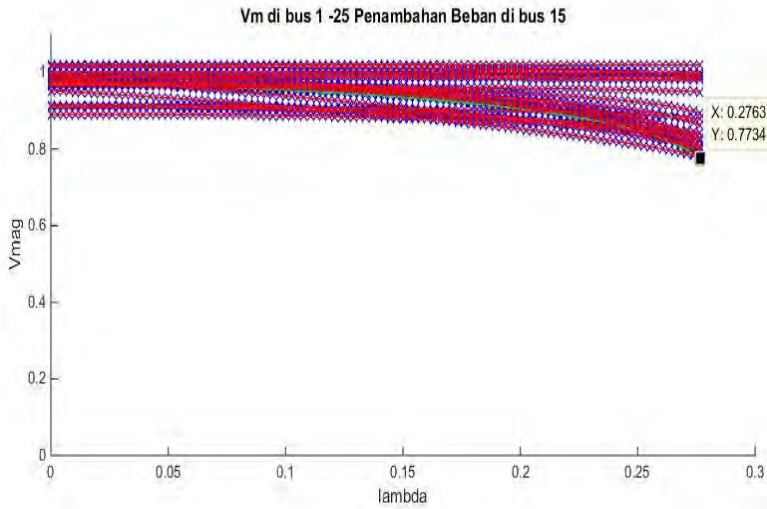
Tabel 4.4.1.10 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 12

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Kembangan (5)	0.289474	0.7746	111	0	109



Gambar 4.4.1.20 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 12 (Cibatu)

11. Penambahan pada bus beban 15 (Bandung Selatan)

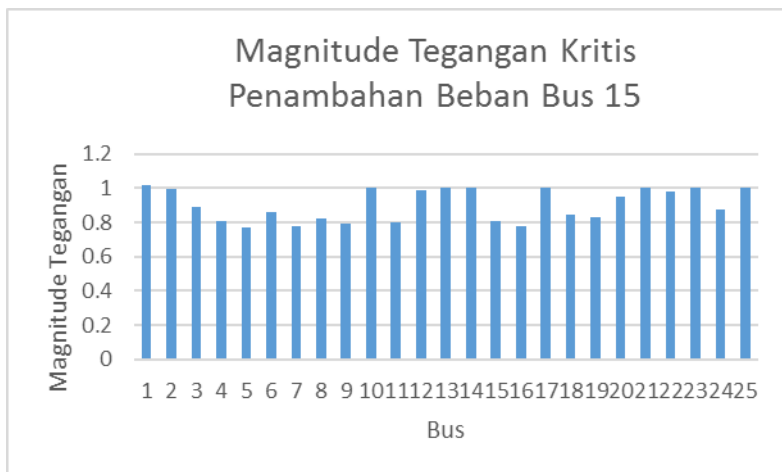


Gambar 4.4.1.21 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 15 (Bandung Selatan)

Gambar 4.4.1.21 terlihat bahwa kurva bus 5 (Kembangan) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

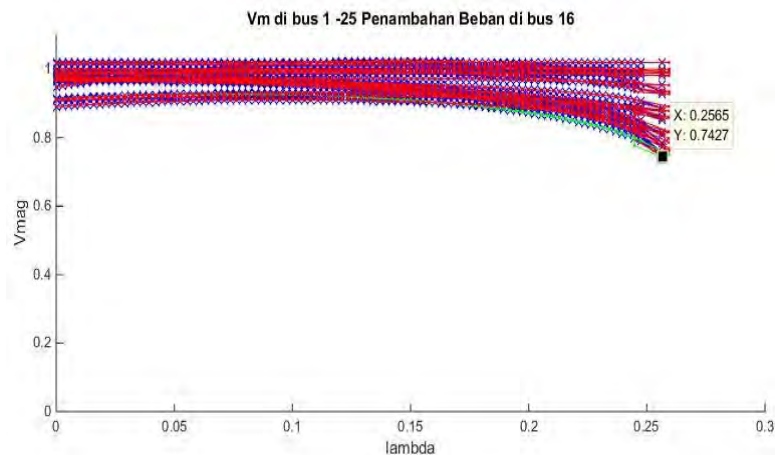
Tabel 4.4.1.11 Tabel Data Bus 5 Saat Penambahan Beban pada Bus 15

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Kembangan (5)	0.276316	0.7734	106	0	104



Gambar 4.4.1.22 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 15 (Bandung Selatan)

12. Penambahan pada bus beban 16 (Mandiracan)

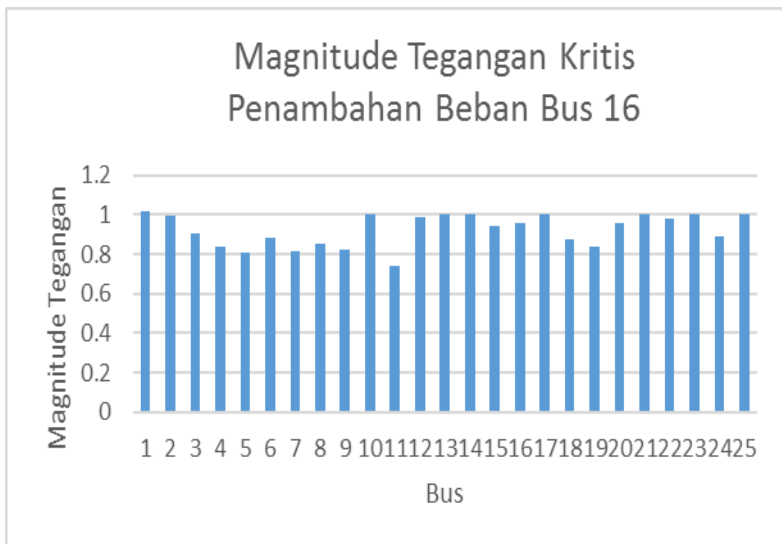


Gambar 4.4.1.23 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 16 (Mandiracan)

Gambar 4.4.1.23 terlihat bahwa kurva bus 11 (Tasikmalaya) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

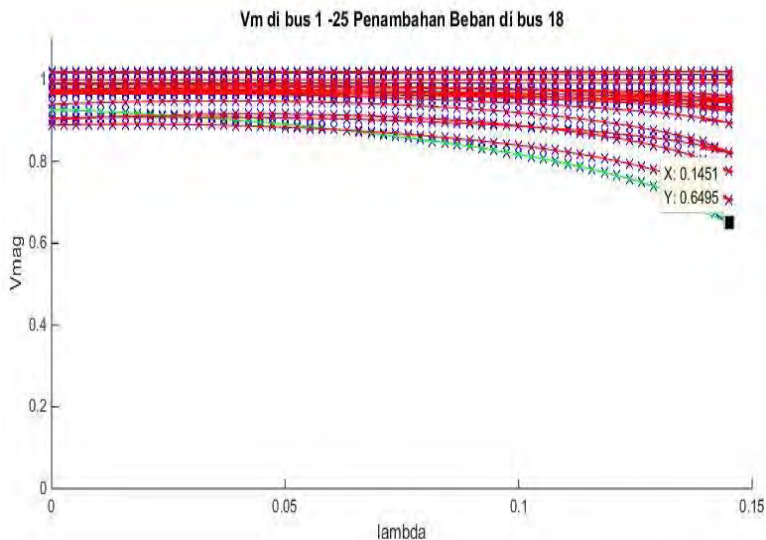
Tabel 4.4.1.12 Tabel Data Bus 11 Saat Penambahan Beban pada Bus 16

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Tasikmalaya (11)	0.256526	0.7427	95	1	93



Gambar 4.4.1.24 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 16 (Mandiracan)

13. Penambahan pada bus beban 18 (Ungaran)

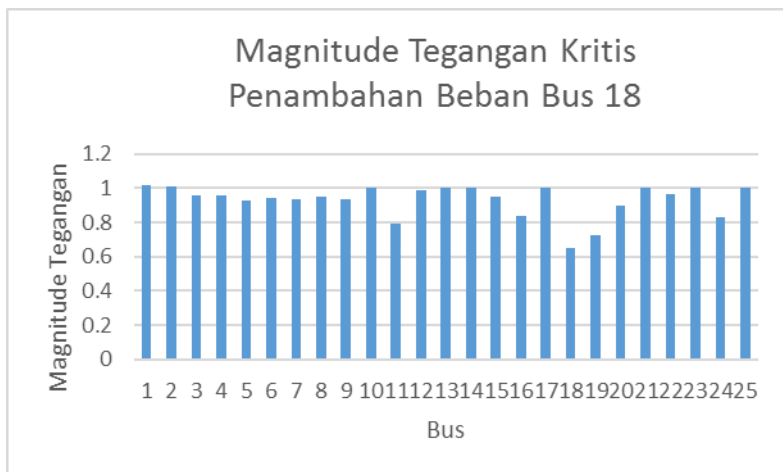


Gambar 4.4.1.25 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 18 (Ungaran)

Gambar 4.4.1.25 terlihat bahwa kurva bus 18 (Ungaran) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

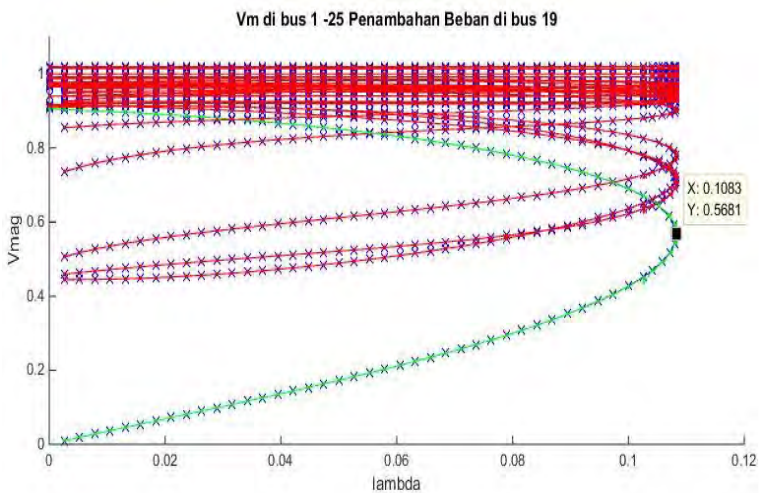
Tabel 4.4.1.13 Tabel Data Bus 18 Saat Penambahan Beban pada Bus 18

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Ungaran (18)	0.145067	0.6495	55	1	53



Gambar 4.4.1.26 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 18 (Ungaran)

14. Penambahan pada bus beban 19 (Pedan)

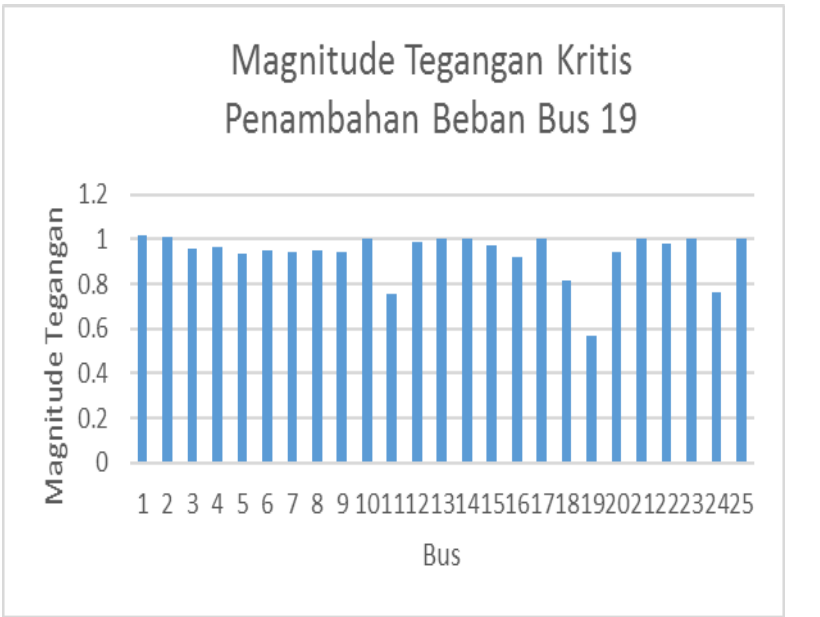


Gambar 4.4.1.27 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 19 (Pedan)

Gambar 4.4.1.27 terlihat bahwa kurva bus 19 (Pedan) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan

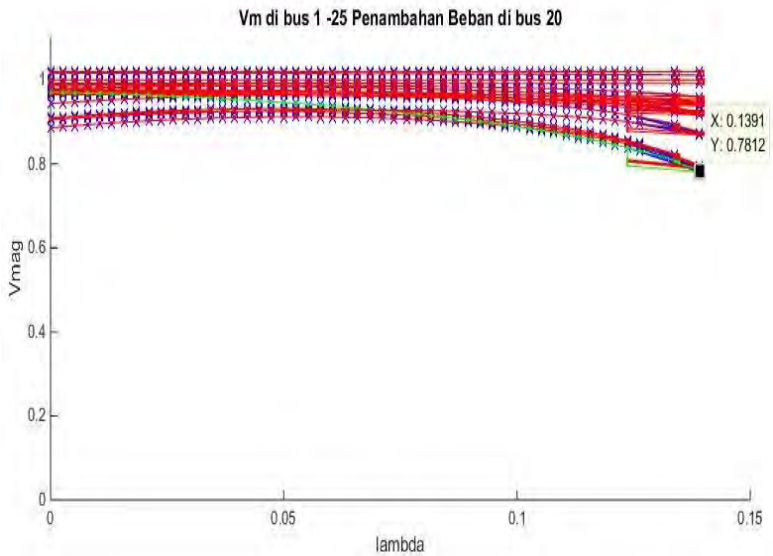
Tabel 4.4.1.14 Tabel Data Bus 19 Saat Penambahan Beban pada Bus 19

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Pedan (19)	0.108254	0.5681	41	7	39



Gambar 4.4.1.28 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 19 (Pedan)

15. Penambahan pada bus beban 20 (Ngimbang)

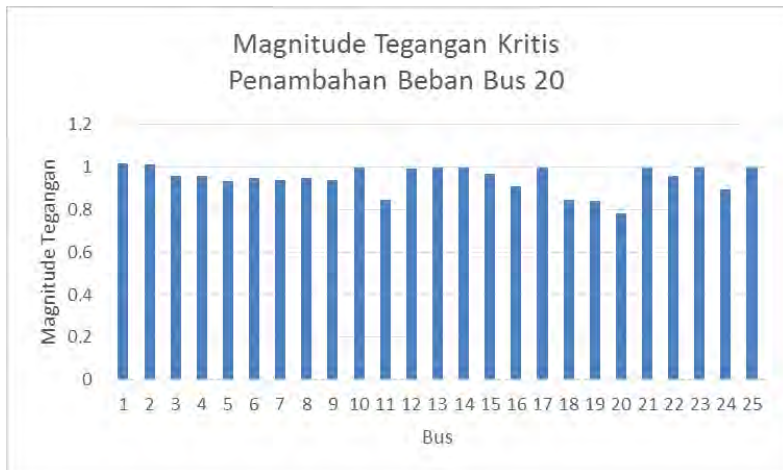


Gambar 4.4.1.29 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 20 (Ngimbang)

Gambar 4.4.1.29 terlihat bahwa kurva bus 20 (Ngimbang) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

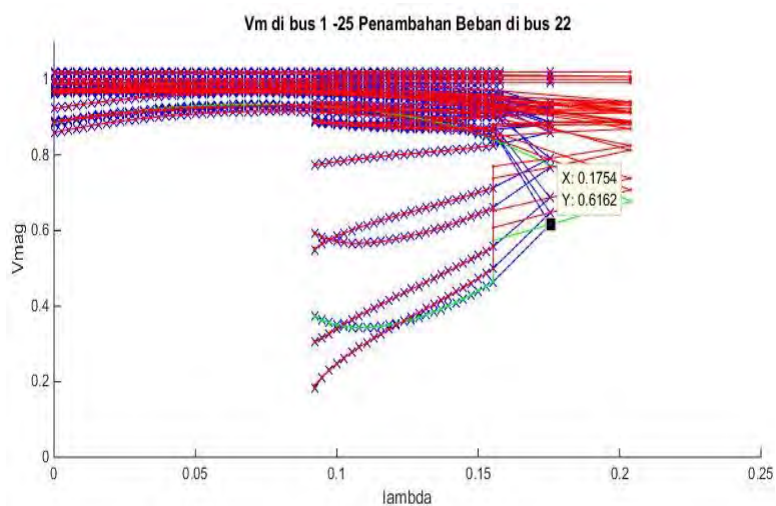
Tabel 4.4.1.15 Tabel Data Bus 20 Saat Penambahan Beban pada Bus 20

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Ngimbang (20)	0.139067	0.7812	49	2	47



Gambar 4.4.1.30 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 20 (Ngimbang)

16. Penambahan pada bus beban 22 (Surabaya Barat)

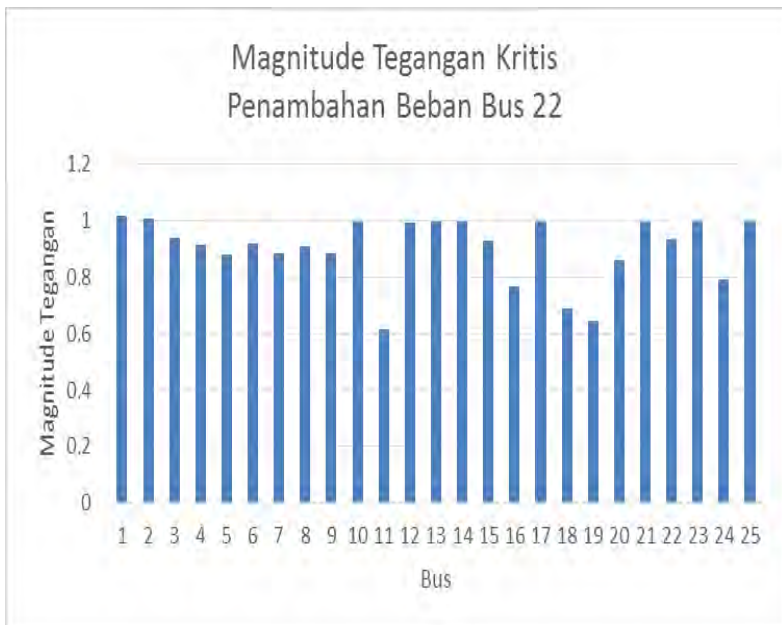


Gambar 4.4.1.31 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 22 (Surabaya Barat)

Gambar 4.4.1.31 terlihat bahwa kurva bus 11 (Tasikmalaya) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

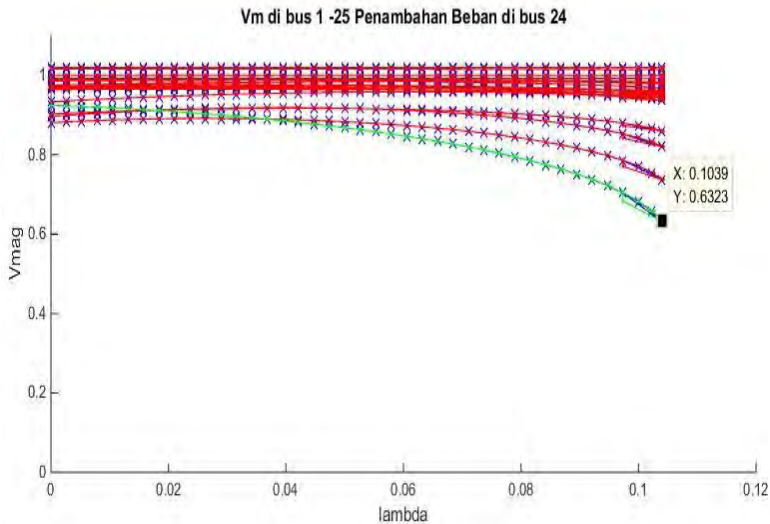
Tabel 4.4.1.16 Tabel Data Bus 11 Saat Penambahan Beban pada Bus 22

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Tasikmalaya (11)	0.175424	0.6162	61	1	25



Gambar 4.4.1.32 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 22 (Surabaya Barat)

17. Penambahan pada bus beban 24 (Kediri)

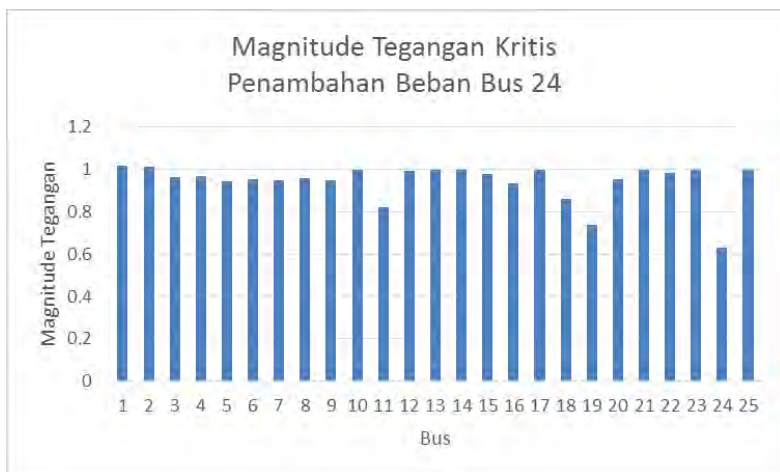


Gambar 4.4.1.33 Kurva CPF pada Penambahan Beban di Bus 24 (Kediri)

Gambar 4.4.1.33 terlihat bahwa kurva bus 24 (Kediri) tersebut memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan bus lainnya ketika berada pada kondisi lambda maksimum. Dimana kurva tersebut memiliki kondisi yang rentan saat diberi pembebanan.

Tabel 4.4.1.17 Tabel Data Bus 24 Saat Penambahan Beban pada Bus 24

Bus	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis	Jumlah Iterasi		
			Fase 1	Fase 2	Fase 3
Kediri (24)	0.103923	0.6323	39	2	37



Gambar 4.4.1.34 Grafik Magnitud Tegangan Kritis pada Penambahan Beban di Bus 24 (Kediri)

4.4.2. Penentuan Bus yang paling Rentan dengan Perubahan Beban

Dari simulasi penambahan beban pada semua bus beban, maka didapatkan bus yang rentan dari dengan perubahan beban. Bus yang rentan dengan perubahan beban adalah bus yang memiliki nilai magnitud tegangan yang paling rendah ketika nilai lambda maksimum.

Tabel 4.4.2.1 Tabel Data Bus yang Rentan dengan Perubahan Beban

Bus Penambahan Beban	Bus yang Rentan dengan Perubahan Beban	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis
Cilegon (2)	Cilegon (2)	1.285168	0.5628
Cawang (3)	Cawang (3)	0.227588	0.4964
Balaraja (4)	Balaraja (4)	0.339807	0.5969
Kembangan (5)	Kembangan (5)	0.194249	0.5831
Bekasi (6)	Bekasi (6)	0.225615	0.5882
Gandul (7)	Gandul (7)	0.306397	0.6875
Cibinong (8)	Kembangan (5)	0.240804	0.6596

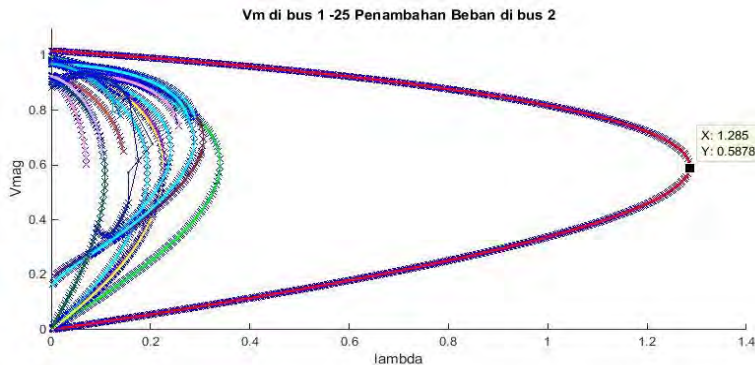
Bus Penambahan Beban	Bus yang Rentan dengan Perubahan Beban	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis
Depok (9)	Kembangan (5)	0.287738	0.6833
Tasikmalaya (11)	Tasikmalaya (11)	0.070972	0.603
Cibatu (12)	Kembangan (5)	0.289474	0.7746
Bandung Selatan (15)	Kembangan (5)	0.276316	0.7734
Mandiracan (16)	Tasikmalaya (11)	0.256526	0.7427
Ungaran (18)	Ungaran (18)	0.145067	0.6495
Pedan (19)	Pedan (19)	0.108254	0.5681
Ngimbang (20)	Ngimbang (20)	0.139067	0.7812
Surabaya Barat (22)	Tasikmalaya (11)	0.175424	0.6162
Kediri (24)	Kediri (24)	0.103923	0.6323



Gambar 4.4.2.1 Grafik Bus yang Rentan dengan Perubahan Beban

Dari gambar 4.4.2.1 diketahui dari semua penambahan beban pada bus beban hingga mencapai titik kritis didapatkan bus yang terlemah yaitu bus 5 (Kembangan) yang muncul lima kali dan 11 (Tasikmalaya) yang muncul tiga kali, sedangkan pada penambahan bus beban lainnya berpengaruh terhadap lemahnya bus itu sendiri. SVC akan dipasang

pada kedua bus tersebut. Pada bus 11 memiliki nilai λ yang rendah ketika mencapai titik kritis, maka untuk penentuan kapasitas SVC akan dilakukan pada 11 terlebih dahulu dan dilanjutkan pada bus 5.



Gambar 4.4.2.2 Kurva CPF pada Bus yang Rentan dengan Perubahan Beban

4.5. Penentuan Nilai Kapasitas SVC pada Bus

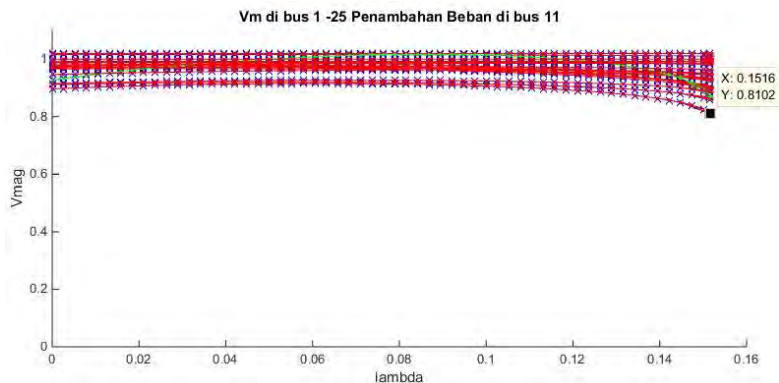
Penentuan nilai kapasitas SVC akan dilakukan pada bus 11 (Tasikmalaya) dan dilanjutkan pada bus 5 (Kembangan) dengan menggunakan metode CPF. Nilai magnitud tegangan tidak boleh melebihi 1,05 pada kurva CPF. Bus beban untuk penambahan beban dipilih dari hasil λ yang paling kecil.

1. Bus Tasikmalaya (11)

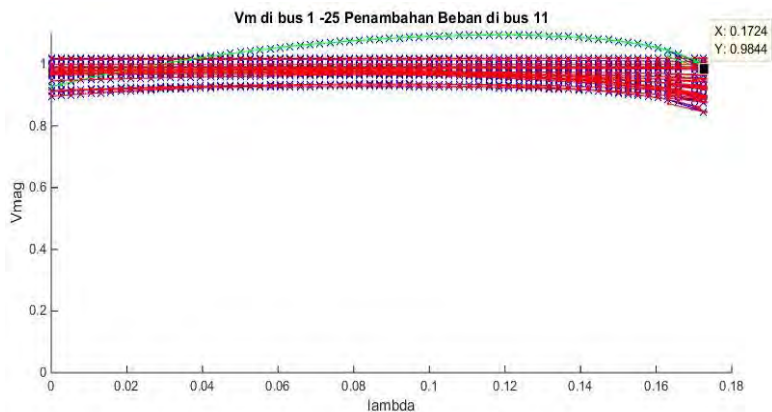
Penambahan beban dilakukan pada bus beban 11 (tasikmalaya.) Nilai Injeksi VAR SVC dilakukan 2 tahap yaitu nilai kurva bus magnitud tegangan tidak boleh melebihi 1.05 dan nilai magnitud tegangan kritis 0.95-1.05.

Tabel 4.5.1 Tabel Data Injeksi VAR SVC pada Bus Tasikmalaya

Bus	Injeksi VAR SVC (MVAR)	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis
Tasikmalaya (11)	0	0.070972	0.603
Tasikmalaya (11)	250	0.151576	0.8102
Tasikmalaya (11)	310	0.175424	0.9844



Gambar 4.5.1 Kurva CPF pada Bus Tasikmalaya dengan Injeksi VAR 250 MVAR



Gambar 4.5.2 Kurva CPF pada Bus Tasikmalaya dengan Injeksi VAR 310 MVAR

Dari gambar 4.5.1 diketahui nilai magnitud tegangan dan lambda naik pada kurva bus 11 (Tasikmalaya), tetapi nilai magnitud tegangan belum memenuhi standar 0.95-1.05 ketika lambda maksimum. Pada gambar 4.5.2 diketahui nilai magnitud tegangan memenuhi standar 0.95-1.05 ketika lambda maksimum, tetapi nilai magnitud tegangan melebihi 1.1 saat lambda tertentu. Oleh karena itu dibutuhkan SVC untuk

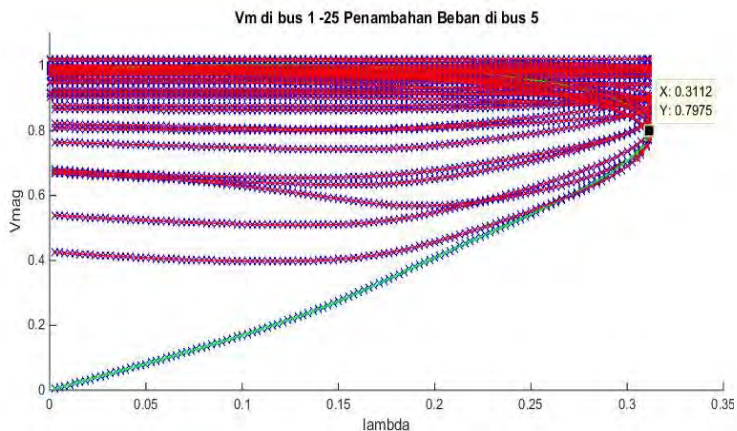
menginjeksi VAR dikarenakan nilai VAR SVC dapat dirubah-rubah (*variable*) sesuai dengan kebutuhan beban (nilai λ).

2. Bus Kembangan (5)

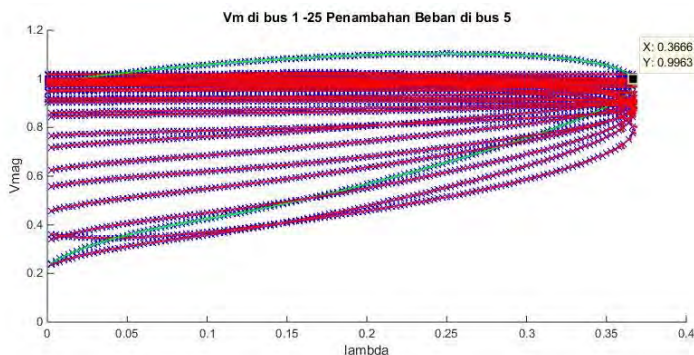
SVC pada bus 11 (Tasikmalaya) di injeksi dengan nilai 250 MVAR. Penambahan beban dilakukan pada bus beban 5 (Kembangan). Nilai Injeksi VAR SVC dilakukan 2 tahap yaitu nilai kurva bus magnitud tegangan tidak boleh melebihi 1.05 dan nilai magnitud tegangan kritis 0.95-1.05.

Tabel 4.5.2 Tabel Data Injeksi VAR SVC pada Bus Kembangan

Bus	Injeksi VAR SVC (MVAR)	Lambda Maksimum	Magnitud Tegangan Kritis
Kembangan (5)	0	0.194249	0.5831
Kembangan (5)	480	0.311215	0.7975
Kembangan (5)	750	0.366551	0.9963



Gambar 4.5.3 Kurva CPF pada Bus Kembangan dengan Injeksi VAR 480 MVAR



Gambar 4.5.4 Kurva CPF pada Bus Kembangan dengan Injeksi VAR 750 MVAR

Dari gambar 4.5.3 diketahui nilai magnitud tegangan dan lambda naik pada kurva bus 5 (Kembangan), tetapi nilai magnitud tegangan belum memenuhi standar 0.95-1.05 ketika lambda maksimum. Pada gambar 4.5.4 diketahui nilai magnitud tegangan memenuhi standar 0.95-1.05 ketika lambda maksimum, tetapi nilai magnitud tegangan melebihi 1.1 saat lambda tertentu. Oleh karena itu dibutuhkan SVC untuk menginjeksi VAR dikarenakan nilai VAR SVC dapat dirubah-rubah (*variable*) sesuai dengan kebutuhan beban (nilai lambda).

SVC pada bus 11 (Tasikmalaya) di injeksi dengan nilai 250 MVAR dan bus 5 (Kembangan) 480 MVAR dengan Penambahan beban pada bus 11 dan 5. Aliran Daya dengan menggunakan metode *newton raphson* didapatkan perbedaan nilai magnitud sesuai dengan tabel 4.5.3.

Tabel 4.5.3 Tabel Data Perbandingan Magnitud Tegangan

Bus	Magnitud Tegangan (Tanpa SVC)	Magnitud Tegangan (Dengan SVC)	% Kenaikan
1	1.020	1.020	0.00%
2	1.015	1.016	0.10%
3	0.941	0.952	1.16%
4	0.977	0.986	0.91%
5	0.945	0.971	2.68%

Lanjutan Tabel

Bus	Magnitud Tegangan (Tanpa SVC)	Magnitud Tegangan (Dengan SVC)	% Kenaikan
6	0.936	0.947	1.16%
7	0.951	0.967	1.65%
8	0.949	0.961	1.25%
9	0.948	0.963	1.56%
10	0.970	0.980	1.02%
11	0.898	0.935	3.96%
12	0.957	0.962	0.52%
13	0.960	0.960	0.00%
14	0.950	0.950	0.00%
15	0.933	0.934	0.11%
16	0.911	0.913	0.22%
17	1.000	1.000	0.00%
18	0.898	0.903	0.55%
19	0.888	0.901	1.44%
20	0.932	0.934	0.21%
21	0.950	0.950	0.00%
22	0.945	0.945	0.00%
23	0.970	0.970	0.00%
24	0.907	0.913	0.66%
25	1.000	1.000	0.00%

Dari data pada tabel diatas diketahui adanya kenaikan magnitud tegangan ketika menggunakan SVC. Kenaikan magnitud tegangan berpengaruh dengan *losses* sesuai dengan tabel 4.5.4

Tabel 4.5.4 Tabel Data Perbandingan *Losses* Saluran

<i>Losses saluran</i> (Tanpa SVC)		<i>Losses saluran</i> (Dengan SVC)	
MW	MVAR	MW	MVAR
286.719	3047.473	278.94	2968.452

LAMPIRAN

```
function [MVAbase,bus,gen,branch] = jamali

%% Nilai MVA base
MVAbase = 1000;

%% Data Bus
%   bus_i   type   Pd   Qd   Gs   Bs   area   Vm
%   baseKV  zone   Vmax   Vmin
bus = [
1   3       155   43   0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Suralaya)
2   1       358  144  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Cilegon)
3   1       626  177  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Cawang)
4   1       495  166  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Balaraja)
5   1       660  236  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Kembangan)
6   1       1192 390  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Bekasi)
7   1       827   91  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Gundul)
8   1       431  308  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Cibinong)
9   1       444   73  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Depok)
10  2        0    0   0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Muara Tawar)
11  1       283  101  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Tasikmalaya)
12  1       888  496  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Cibatu)
13  2       633  221  0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Cirata)
14  2        0    0   0    0    1       1   0   500
1       1.1 0.9;           %(Saguling)
```

```

15 1      548    250 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Bandung Selatan)
16 1      -19     9 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Mandiracan)
17 2      321     65 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Tanjung Jati)
18 1      924    565 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Ungaran)
19 1      744    262 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Pedan)
20 1      191     25 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Ngimbang)
21 2      160     82 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Gresik)
22 1      954    256 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Surabaya Barat)
23 2      576    303 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Grati)
24 1      785    279 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Kediri)
25 2      729    123 0    0 1      1 0    500
1      1.1 0.9;      %(Paiton)
];

%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin
Vg mBase status Pmax
% Pmin Pcl Pc2 Qclmin Qclmax Qc2min
Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q Qsh
gen = [
1 3298.35 1023.3 1941.193 -934.071 1.02
1000 1 3800 1450 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0;
10 1629.56 846.77 817.701 -220.963 1.0
1000 1 1759 703.6 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0;
13 378 156 173.676 -160 1.0
1000 1 504 201.6 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0;

```

```

14  349.41  125.33  134.084      -345.702      1.0
1000    1   525      210      0    0    0    0    0
0    0    0    0    0    0;
17  2487      356      1306.666      -615.334      1.0
1000    1   2640      1056      0    0    0    0    0
0    0    0    0    0    0;
21  455.95  146.53  142          -76          1.0
1000    1   526.35  210.54    0    0    0    0    0
0    0    0    0    0    0;
23  420.36  150.41  291.724      -114.419      1.0
1000    1   462.25  184.9     0    0    0    0    0
0    0    0    0    0    0;
25  4326.36  970.08  2426.713      -1271.47      1.0
1000    1   4714      1886      0    0    0    0    0
0    0    0    0    0    0;
];
%% Data Saluran
%   fbus      tbus      r          x          1/2 b
rateA  rateB  rateC  ratio  angle  status
angmin angmax
branch = [
1       2   0.000626496  0.007008768  0.00000010
4800    4800      4800      0          0          1
-360    360;
1       4   0.003677677  0.035333317  0.00000052
3960    3960      3960      0          0          1
-360    360;
2       8   0.013133324  0.146925792  0.00000106
2400    2400      2400      0          0          1
-360    360;
6       8   0.004441880  0.042675400  0.00000031
1980    1980      1980      0          0          1
-360    360;
6       3   0.001973648  0.018961840  0.00000014
1980    1980      1980      0          0          1
-360    360;
7       4   0.002979224  0.028622920  0.00000037
3960    3960      3960      0          0          1
-360    360;

```

7	5	0.001513179	0.016928308	0.000000024
4800	4800	4800	0	0
-360	360;			1
8	14	0.004111380	0.045995040	0.000000065
4800	4800	4800	0	0
-360	360;			1
9	8	0.000818994	0.007868488	0.000000011
4800	4800	4800	0	0
-360	360;			1
9	7	0.000694176	0.006669298	0.000000006
4800	4800	4800	0	0
-360	360;			1
10	8	0.006211600	0.059678000	0.000000041
1980	1980	1980	0	0
-360	360;			1
10	3	0.005625600	0.054048000	0.000000033
1980	1980	1980	0	0
-360	360;			1
11	9	0.014056000	0.157248000	0.000000223
4800	4800	4800	0	0
-360	360;			1
12	13	0.002739960	0.026324191	0.000000037
3960	3960	3960	0	0
-360	360;			1
12	10	0.002822059	0.027112954	0.000000039
3960	3960	3960	0	0
-360	360;			1
14	15	0.001957800	0.021902400	0.000000030
4800	4800	4800	0	0
-360	360;			1
14	13	0.001474728	0.014168458	0.000000020
3960	3960	3960	0	0
-360	360;			1
16	15	0.006990980	0.067165900	0.000000096
3960	3960	3960	0	0
-360	360;			1
16	18	0.013478000	0.129490000	0.000000180
3960	3960	3960	0	0
-360	360;			1

```

18      19  0.009036120  0.086814600  0.00000061
2400    2400      2400      0      0      1
-360    360;
18      20  0.023479613  0.225580588  0.00000167
1980    1980      1980      0      0      1
-360    360;
18      17  0.013533920  0.151407360  0.00000109
4800    4800      4800      0      0      1
-360    360;
19      24  0.010291000  0.115128000  0.00000164
4800    4800      4800      0      0      1
-360    360;
19      11  0.015311000  0.171288000  0.00000246
4800    4800      4800      0      0      1
-360    360;
20      22  0.005966652  0.057324466  0.00000038
1980    1980      1980      0      0      1
-360    360;
21      22  0.001394680  0.013399400  0.00000019
3960    3960      3960      0      0      1
-360    360;
22      18  0.015798560  0.151784800  0.00000215
1980    1980      1980      0      0      1
-360    360;
22      23  0.003986382  0.044596656  0.00000075
4800    4800      4800      0      0      1
-360    360;
25      23  0.004435823  0.049624661  0.00000071
4800    4800      4800      0      0      1
-360    360;
25      24  0.010291000  0.115128000  0.00000169
4800    4800      4800      0      0      1
-360    360;
];

```

```

function [max_lambda, predicted_list,
corrected_list, combined_list, success, et] =
cpf>NamaSistem, LokasiPenambahanBeban,
StepSizeUntukLambda, StepSizeUntukTegangan)
%% kode bus, generatorator, dan saluran

```

```

BUS_I = 1;
BUS_TYPE = 2;
Bus_Beban = 1;
Bus_generator = 2; %% bus generator
Bus_Slack = 3;
KebutuhanDayaAktif = 3; %% KebutuhanDayaAktif,
KebutuhanDayaReaktif = 4; %%KebutuhanDayaReaktif
GS = 5;
BS = 6;
Sudut_Tegangan = 9; %% Sudut_Tegangan,
PRICE_Bus_Slack_BUS = 2;
generator_BUS = 1;
PG = 2;
QG = 3;
Magnitude_Tegangan = 6;
Status_generatorerator = 8;
Dari_Bus = 1;
Ke_Bus = 2;
Resistansi = 3; %% r, resistansi(p.u.)
Reaktansi = 4; %% x, reaktansi (p.u.)
BR_B = 5; %% b
TAP = 9;
SHIFT = 10;
Status_Saluran = 11; %% initial saluran
status, 1 - in service, 0 - out of service
bus_total = 25;
generator_total = 8;
%% Parameter Standar
if nargin < 3
    StepSizeUntukLambda = 0.1;
    StepSizeUntukTegangan = 0.025;
end

%% options
iterasi_maksimum = 1000; %
depends on selection of stepsizes
verbose = 1;

```



```

slopeThresh_Phase1 = 0.5; % Bus_generator curve
slope shreshold for voltage prediction-
correction (with lambda increasing)
slopeThresh_Phase2 = 0.3; % Bus_generator curve
slope shreshold for lambda prediction-correction

%% Ambil data dari sistem jamali 500kV
%% baris pengisian data
[MVABase, bus, generator, saluran] = jamali;
    %% create map of external bus numbers to bus
indices
    i2e = bus(:, BUS_I);
    e2i = sparse(max(i2e), 1);
    e2i(i2e) = (1:size(bus, 1))';
%% renumber buses consecutively
    bus(:, BUS_I)= e2i( bus(:, BUS_I));
generator(:, generator_BUS)= e2i( generator(:,
generator_BUS));
saluran(:,Dari_Bus)= e2i(saluran(:,Dari_Bus));
saluran(:, Ke_Bus)= e2i( saluran(:, Ke_Bus));
e2i = sparse(max(i2e), 1);
e2i(i2e) = (1:size(bus, 1))';
LokasiPenambahanBeban_i =
e2i(LokasiPenambahanBeban);
generator_BUS      = 1;      %% bus number
Status_generatorator = 8; %% status, 1 -
machine in service, 0 - machine out of service
nq = bus_total +generator_total + 5;
%% get generatorator status
nb = size(bus, 1);
ng = size(generator, 1);
Cg = sparse(generator(:, generator_BUS),
(1:ng)', generator(:, Status_generatorator) >
0, nb, ng); %% generator connection matrix
%%element i, j is 1 if, generatorator j at bus
i is ON
bus_Status_generatorator = Cg * ones(ng, 1);
%% number of generatorators at each bus that
are ON

```

```

%% form index lists for slack, Bus_generator,
and Bus_Beban buses
Bus_Slack = find(bus(:, BUS_TYPE) == Bus_Slack &
bus_Status_generatorerator);    %%
Bus_Slackerence bus index
Bus_generator = find(bus(:, BUS_TYPE) ==
Bus_generator & bus_Status_generatorerator);
%% Bus_generator bus indices
Bus_Beban = find(bus(:, BUS_TYPE) == Bus_Beban
| ~bus_Status_generatorerator);    %% Bus_Beban
bus indices

%% pick a new Bus_Slackerence bus if for some
reason there is none (may have been shut down)
if isempty(Bus_Slack)
    Bus_Slack = Bus_generator(1);
%% use the first Bus_generator bus
    Bus_generator =
Bus_generator(2:length(Bus_generator));    %%
take it off Bus_generator list
end

%% generatorerator info
on = find(generator(:, Status_generatorerator) >
0);    %% which generatorerators are on?
gbus = generator(on, generator_BUS);
%% what buses are they at?

if nargin < 3
    mpc = MVAbase;
    MVAbase = mpc.MVAbase;
    bus = mpc.bus;
    saluran = mpc.saluran;
end

%% constants
nb = size(bus, 1);    %% number of buses
nl = size(saluran, 1);    %% number of lines

```

```

%% check that bus numbers are equal to indices
to bus (one set of bus numbers)
if any(bus(:, BUS_I) ~= (1:nb)')
    error('buses must appear in order by bus
number')
end

%% for each saluran, compute the elements of the
saluran admittance matrix where
stat = saluran(:, Status_Saluran);
%% ones at in-service saluranes
Ys = stat ./ (saluran(:, Resistansi) + 1j *
saluran(:, Reaktansi)); %% series admittance
Bc = stat .* saluran(:, BR_B);
%% line charging susceptance
tap = ones(nl, 1);
%% default tap ratio = 1
i = find(saluran(:, TAP));
%% indices of non-zero tap ratios
tap(i) = saluran(i, TAP);
%% assign non-zero tap ratios
tap = tap .* exp(1j*pi/180 * saluran(:, SHIFT));
%% add phase shifters
Ytt = Ys + 1j*Bc/2;
Yff = Ytt ./ (tap .* conj(tap));
Yft = - Ys ./ conj(tap);
Ytf = - Ys ./ tap;
%% i.e.  $Y_{sh} = P_{sh} + j Q_{sh}$ , so ...
Ysh = (bus(2,GS) - 1j*bus(2,BS));
Ysh = (bus(:, GS) + 1j * bus(:, BS)) / MVAbase;
%% vector of shunt admittances

%% bentuk matriks saluran
f = saluran(:, Dari_Bus);
%% list of "from" buses
t = saluran(:, Ke_Bus);
%% list of "to" buses
Cf = sparse(1:nl, f, ones(nl, 1), nl, nb);
%% connection matrix for line & from buses

```

```

Ct = sparse(1:nl, t, ones(nl, 1), nl, nb);
%% connection matrix for line & to buses

i = [1:nl; 1:nl]';
%% double set of row indices
Yf = sparse(i, [f; t], [Yff; Yft], nl, nb);
Yt = sparse(i, [f; t], [Ytf; Ytt], nl, nb);

%% bentuk Y bus
Ybus = Cf' * Yf + Ct' * Yt + ...
%% saluran admittances
        sparse(1:nb, 1:nb, Ysh, nb, nb);
%% shunt admittance

%MENGATUR KENAIKAN NILAI LAMBDA)
flag_lambdaIncrease = true; % flag indicating
lambda is increasing or decreasing
if bus(LokasiPenambahanBeban_i,
KebutuhanDayaAktif) == 0
    initQPratio = 0;
    fprintf('\t[Warning]:\tLoad real power at
bus %d is 0. Q/P ratio will be fixed at 0.\n',
LokasiPenambahanBeban);
else
    initQPratio = bus(LokasiPenambahanBeban_i,
KebutuhanDayaReaktif)./bus(LokasiPenambahanBeban
_i, KebutuhanDayaAktif);
end
lambda0 = 0;
lambda = lambda0;
Vm = ones(size(bus, 1), 1);           %% flat
start
Sudut_Tegangan = bus(Bus_Slack(1),
Sudut_Tegangan) * Vm;
V = Vm .* exp(sqrt(-1) * pi/180 *
Sudut_Tegangan);
V(gbus) = generator(on, Magnitude_Tegangan) ./
abs(V(gbus)).* V(gbus);

```

```

pointCnt = 0;

%% Prediktor
lambda_prediksi = lambda;
tegangan_prediksi = V;
[V, lambda, success, iterNum] =
koreksi_tegangan(MVABase, bus, generator, Ybus,
tegangan_prediksi, lambda_prediksi, initQPratio,
LokasiPenambahanBeban_i);
%% record data
pointCnt = pointCnt + 1;
corrected_list(:, pointCnt) = [V;lambda];

%%-----
--
%% Iterasi Prediksi - Koreksi
%%-----
--
t0 = clock;
%% Mulai Fase 1 = prediksi-koreksi tegangan
(kenaikan lambda)
if verbose > 0
    fprintf('Start Phase 1: voltage prediction-
correction (lambda increasing).\n');
end
i = 0;
while i < iterasi_maksimum
    %% KebutuhanDayaAktif iteration counter
    i = i + 1;

    % penyimpanan data
    V_saved = V;
    lambda_saved = lambda;

    %% do voltage prediction to find predicted
    point (predicting voltage)
    [tegangan_prediksi, lambda_prediksi] =
prediksi(Ybus, Bus_Slack, Bus_generator,
Bus_Beban, V, lambda, StepSizeUntukLambda, 1,

```

```

initQPratio, LokasiPenambahanBeban,
flag_lambdaIncrease);

    %% do voltage correction to find corrected
point
    [V, lambda, success, iterNum] =
koreksi_tegangan(MVABase, bus, generator, Ybus,
tegangan_prediksi, lambda_prediksi, initQPratio,
LokasiPenambahanBeban_i);

    %% calculate slope (dP/dLambda) at current
point
    slope = abs(V(LokasiPenambahanBeban_i) -
V_saved(LokasiPenambahanBeban_i))/(lambda -
lambda_saved);
    %% ...we use Bus_generator curve slopes as
the criteria for switching modes
    if abs(slope) >= slopeThresh_Phase1 |
success == false % Approaching nose area of
Bus_generator curve, or correction step fails
        % restore good data
        V = V_saved;
        lambda = lambda_saved;
        if verbose > 0
            fprintf('\t[Info]:\tApproaching nose
area of Bus_generator curve, or voltage
correction fails.\n');
        end
        break;
    else
        if verbose > 2

fprintf('\nVm_predicted\tVm_corrected\n');

%abs(tegangan_prediksi);lambda_prediksi
;abs(V);lambda;
        abs(tegangan_prediksi);abs(V);
        end

```

```

        %% record data
        pointCnt = pointCnt + 1;
        predicted_list(:, pointCnt-1) =
[tegangan_prediksi;lambda_prediksi/nq];
        corrected_list(:, pointCnt) =
[V;lambda/nq];

    end
end
pointCnt_Phase1 = pointCnt; % collect number of
points obtained at this phase
if verbose > 0
    fprintf('\t[Info]:\t%d data points contained
in phase 1.\n', pointCnt_Phase1);
end

%% Fase 2 = penurunan tegangan (prediksi-koreksi
tegangan)
if verbose > 0
    fprintf('Switch to Phase 2: lambda
prediction-correction (voltage decreasing).\n');
end
k = 0;

while k < iterasi_maksimum
    %% KebutuhanDayaAktif iteration counter
    k = k + 1;

    % save good daVmagentacritical=Vm_assigned;ta
V_saved = V;

    %% do lambda prediction to find predicted
point (predicting lambda)
    [tegangan_prediksi, lambda_prediksi, J] =
prediksi(Ybus, Bus_Slack, Bus_generator,
Bus_Beban, V, lambda, StepSizeUntukTegangan, 2,
initQPratio, LokasiPenambahanBeban);
    %% do lambda correction to find corrected
point

```

```

Vm_assigned = abs(tegangan_prediksi);
[V, lambda, success] =
koreksi_lambda(MVABase, bus, generator, Ybus,
Vm_assigned, tegangan_prediksi, lambda_prediksi,
initQPratio, LokasiPenambahanBeban, Bus_Slack,
Bus_generator, Bus_Beban);

%% kalkulasi kemiringan (dV/dLambda) untuk
mencari titik kritis dengan nilai lambda
maksimum
slope = abs(V(LokasiPenambahanBeban_i) -
V_saved(LokasiPenambahanBeban_i))/(lambda -
lambda_saved);
%% ...we use Bus_generator curve slopes as
the criteria for switching modes
if abs(slope) <= slopeThresh_Phase2 |
success == false % Leaving nose area of
Bus_generator curve, or correction step fails
% restore good data
V = V_saved;
lambda = lambda_saved;
Vm_assigned1 = abs(V_saved);
Vmagcritical=Vm_assigned1;
Vcritical=V_saved;

%% ---change to voltage prediction-
correction (lambda decreasing)
if verbose > 0
fprintf('\t[Info]:\tLeaving nose
area of Bus_generator curve, or lambda
correction fails.\n');
end
break;
else
if verbose > 2
fprintf('\nVm_predicted\tVm_corrected\n');
abs(tegangan_prediksi);abs(V);
end

```



```

        %% record data
        pointCnt = pointCnt + 1;
        predicted_list(:, pointCnt-1) =
[tegangan_prediksi;lambda_prediksi/nq];
        corrected_list(:, pointCnt) =
[V;lambda/nq];
    end
end
pointCnt_Phase2 = pointCnt - pointCnt_Phase1; %
collect number of points obtained at this phase
if verbose > 0
    fprintf('\t[Info]:\t%d data points contained
in phase 2.\n', pointCnt_Phase2);
end

%% --- Switch to Phase 3: voltage prediction-
correction (lambda decreasing)
if verbose > 0
    fprintf('Switch to Phase 3: voltage
prediction-correction (lambda decreasing).\n');
end
% set lambda to be decreasing
flag_lambdaIncrease = false;
i = 0;
while i < iterasi_maksimum
    %% KebutuhanDayaAktif iteration counter
    i = i + 1;

    %% do voltage prediction to find predicted
    point (predicting voltage)
    [tegangan_prediksi, lambda_prediksi, J] =
prediksi(Ybus, Bus_Slack, Bus_generator,
Bus_Beban, V, lambda, StepSizeUntukLambda, 1,
initQPratio, LokasiPenambahanBeban,
flag_lambdaIncrease);

    %% do voltage correction to find corrected
    point

```

```

[V, lambda, success, iterNum] =
koreksi_tegangan(MVABase, bus, generator, Ybus,
tegangan_prediksi, lambda_prediksi, initQPratio,
LokasiPenambahanBeban_i);

    %% calculate slope (dP/dLambda) at current
point
    %slope = abs(V(LokasiPenambahanBeban_i) -
V_saved(LokasiPenambahanBeban_i))/(lambda -
lambda_saved);

    if lambda < 0 % lambda is less than 0, then
stops CPF simulation
        if verbose > 0
            fprintf('\t[Info]:\tlambda is less
than 0.\n\t\t\tCPF finished.\n');
            end
            break;
        end

    %% ...we use Bus_generator curve slopes as
the criteria for switching modes
    if success == false % voltage correction
step fails.
        if verbose > 0
            fprintf('\t[Info]:\tVoltage
correction step fails..\n');
            end
            break;
        else
            if verbose > 2

fprintf('\nVm_predicted\tVm_corrected\n');

[[abs(tegangan_prediksi);lambda_prediksi]
[abs(V);lambda]]
            end
            %% record data
            pointCnt = pointCnt + 1;

```

```

        predicted_list(:, pointCnt-1) =
[tegangan_prediksi;lambda_prediksi/nq];
        corrected_list(:, pointCnt) =
[V;lambda/nq];
    end
end
pointCnt_Phase3 = pointCnt - pointCnt_Phase2 -
pointCnt_Phase1; % collect number of points
obtained at this phase
if verbose > 0
    fprintf('\t[Info]:\t%d data points contained
in phase 3.\n', pointCnt_Phase3);
end

et = etime(clock, t0);
predictedCnt = size(predicted_list, 2);
combined_list(:, 1) = corrected_list(:, 1);
for i = 1:predictedCnt
    combined_list(:, 2*i)      =
predicted_list(:, i);
    combined_list(:, 2*i+1)    =
corrected_list(:, i+1);
end

bus(:, BUS_I) = i2e( bus(:, BUS_I));
%% nomor bus pada kolom pertama pada hasil
nb          = size(bus, 1);
max_lambda  = max(corrected_list(nb+1, :));
predicted_list = [[bus(:, BUS_I);0]
predicted_list];
corrected_list = [[bus(:, BUS_I);0]
corrected_list];
combined_list  = [[bus(:, BUS_I);0]
combined_list];
if verbose > 1
    Vm_corrected = abs(corrected_list);
    Vm_predicted = abs(predicted_list);
    Vm_combined  = abs(combined_list);
    Vm_corrected

```

```

        Vm_predicted
        Vm_combined
        pointCnt_Phase1
        pointCnt_Phase2
        pointCnt_Phase3
        pointCnt
    end
    VmagnititudeCriticalPoints=Vmagcritical
    VCriticalPoints=Vcritical
end

function gambar_kurva_PV>NamaSistem,
LokasiPenambahanBeban, corrected_list,
combined_list, flag_combinedCurve, busesToDraw)

%% assign default parameters
if nargin < 6
    busesToDraw = LokasiPenambahanBeban;    %
draw the curve for the load changing bus
end
if isempty(busesToDraw)
    busesToDraw = LokasiPenambahanBeban;    %
draw the curve for the load changing bus
end
%% load the case & convert to internal bus
numbering
[MVAbase,bus,gen,branch] = jamali();
nb = size(bus,1);

correctedDataNum = size(corrected_list, 2) - 1;
combinedDataNum  = size(combined_list, 2) - 1;

%% prepare data for drawing
lambda_corrected = corrected_list(nb+1,
[2:correctedDataNum+1]);
lambda_combined  = combined_list(nb+1,
[2:combinedDataNum+1]);

fprintf('mulai cetak kurva CPF...\n');

```

```

for j = 1:length(busesToDraw)%for i =
1+npv+1:1+npv+npq
    i = find(corrected_list(:, 1) ==
busesToDraw(j)); % find row index

    %% get voltage magnitudes
    Vm_corrected(i,:) = abs(corrected_list(i,
[2:correctedDataNum+1]));
    Vm_combined(i,:) = abs(combined_list(i,
[2:combinedDataNum+1]));

    %% create a new figure
    figure;
    hold on;
    %% plot PV curve
    axis on
    ylim([0 1.2])
    plot(lambda_corrected, Vm_corrected, 'bx-');
    hold on
    %% plot CPF prediction-correction curve
    if flag_combinedCurve == true
        plot(lambda_combined, Vm_combined, 'r.-
');
        legend('CPF Curve', 'Prediction-
Correction Curve');
        legend('lokasi', 'optimal');
    end

    %% add plot title
    ylabel('Vmag')
    xlabel('lambda')
    title(['Vm di bus 1 -' int2str(bus(j)) '
Penambahan Beban di bus '
int2str(LokasiPenambahanBeban)]);
end

fprintf('cetak kurva selesai.\n');

```

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari semua proses yang meliputi studi literatur, serta simulasi dan analisis, maka terdapat beberapa hal yang dapat disimpulkan terkait tugas akhir ini yaitu:

1. Metode *continuation power flow* efektif untuk mengetahui batas kestabilan tegangan pada beban maksimal (kenaikan nilai λ) dari titik kritis yang ditampilkan pada kurva. Nilai titik kritisnya dapat diketahui dari tangen vektornya yang mengandung nilai magnitudo tegangan, dan λ .
2. Pada uji keseluruhan bus beban pada sistem Jawa Bali 500kV didapat nilai λ terbesar ada pada bus 2 (Cilegon) sebesar 1.285168, dan terkecil pada bus 11 (Tasikmalaya) sebesar 0.070972. Bus yang rentan dengan perubahan beban adalah bus 11 (Tasikmalaya) yang muncul sebanyak tiga kali dan memiliki nilai λ yang terkecil serta bus 5 (Kembangan) yang muncul lima kali.
3. Dari nilai λ dapat diketahui berapa persen tingkat kenaikan beban di masing-masing bus pada sistem Jawa Bali 500kV.
4. Pemasangan SVC dengan menginjeksi VAR pada bus menyebabkan kenaikan magnitudo tegangan dan nilai λ .
5. Pada uji penentuan nilai injeksi VAR pada bus diketahui magnitudo tegangan kritis mencapai nilai standar 0.95-1.05, tetapi pada nilai λ tertentu menghasilkan magnitudo tegangan yang melebihi 1.05, maka dari itu dibutuhkan injeksi VAR yang dapat dirubah (*variable*) sesuai kebutuhan beban yaitu SVC.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian berikutnya yaitu dengan melengkapi data dengan cara-cara memperbaiki kestabilan tegangan di sistem Jawa Bali 500kV ini. Selain itu juga bisa menggunakan metode lain untuk analisa kestabilan tegangan dan penentuan kapasitas SVC.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lahacani, N.Aouzelag, B. Mendil, “*SVC Modelling and Simulation for Power System Flow Studies : Electrical Network in Over-Voltage*”, A. Mira University.
- [2] Lahacani, N.Aouzelag, B. Mendil, “*SVC Modelling and Simulation for Power System Flow Studies : Electrical Network in Over-Voltage*”, A. Mira University.
- [3] Anupana, Shukla and Associate Prof. Arti Bhandakkar, “*Steady State Voltage Stability Improvement by Determination of Best Location of SVC with Minimum Losses*”, Shri Ram Institute of Technology Jabalpur MP: India.
- [4] Padiyar K. R., “*FACTS Controllers In Power Transmission and Distribution*”, Department of Electrical Engineering Indian Institute of Science Bangalore-560 012:India.
- [5] Lastarda, Niko, “*Optimasi Power Flow Untuk Memaksimalkan Injeksi Daya Dari Sistem Pembangkit Tenaga Angin*”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS, Surabaya, 2013.
- [6] Stevenson Jr, William D., “*Elements of Power System Analysis*”. 4th ed. Mc Graw-Hill International Book Company: Singapore.
- [7] Kundur, P. (1994). “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill: New York.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

RIWAYAT PENULIS



I Nyoman Rasmiyanto lahir di Surabaya pada tanggal 28 Desember 1989. Anak kedua dari empat bersaudara. Menempuh pendidikan formal di SDN Kedungdoro II/307 Surabaya lulus pada tahun 2002, SMPN 3 Surabaya lulus pada tahun 2005, SMKN 5 Surabaya lulus pada tahun 2009. Kemudian melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan D3 Teknik Elektro bidang studi komputer kontrol lulus pada tahun 2012 dan melanjutkan studi S1 Lintas Jalur pada Bidang Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email *inyomanrasmiyanto@gmail.com*